



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY**

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

**NÁVRH A REALIZACE ODOMETRICKÝCH
SNÍMAČŮ PRO MOBILNÍ ROBOT S
ACKERMANNOVÝM ŘÍZENÍM**

DESIGN AND REALIZATION OF ODOMETRY SENSORS FOR MOBILE ROBOT WITH
ACKERMANN STEERING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Petr Porteš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Hrbáček

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student: **Bc. Petr Porteš**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Mechatronika
Vedoucí práce: **Ing. Jan Hrbáček**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh a realizace odometrických snímačů pro mobilní robot s Ackermannovým řízením

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Platforma Bender 2 byla na VUT FSI vyvinuta pro účely výzkumu v oblasti autonomní mobilní robotiky, a to jak ve vnitřním, tak i venkovním prostředí. Jednou ze základních senzorických informací potřebných pro lokalizaci robotu je odhad relativní změny polohy, tedy proces odometrie. Zadáním diplomové práce je návrh odometrických snímačů pro říditelná přední kola mobilního robotu Bender 2 a implementace příslušných metod zpracování signálu.

Cíle diplomové práce:

- 1) Seznamte se s kinematickým modelem Ackermannova řízení
- 2) Navrhněte vhodnou konstrukci odometrických snímačů pro robot Bender 2 a snímače realizujte
- 3) Proveďte experimentální vyhodnocení vlastností realizovaných snímačů a vhodnosti dostupných typů kol pro vnitřní a vnější prostředí
- 4) Navrhněte algoritmus zpracování odometrických dat včetně kalibrace na základě dat z bodu 3

Seznam literatury:

GILLESPIE, T. Fundamentals of Vehicle Dynamics. 1st ed. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1992, 495 p. ISBN 15-609-1199-9.

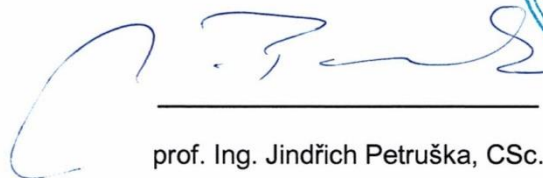
VLK, F. Dynamika motorových vozidel. Vyd. 2. Brno: Prof. Ing. František Vlk, DrSc., nakladatelství a vydavatelství, 2006, 432 s. ISBN 80-239-0024-2.

THRUN, S., BURGARD, W., FOD, D. Probabilistic Robotics. MIT Press, 2006. ISBN 978-0262201629

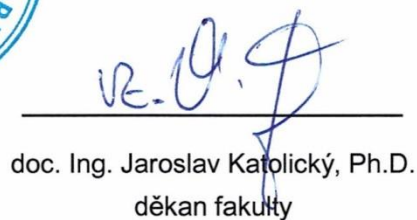
Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17.

V Brně, dne 4. 11. 2016





prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je navrhnout a zkonstruovat odometrické snímače na mobilního robota s Ackermannovým řízením Bender 2 a navrhnout matematický model, který by z dat těchto snímačů vyhodnocoval ujetou trajektorii robota. V první části jsou shrnuty teoretické poznatky, v druhé, zaměřené na praktickou část, jsou popsány konstrukční úpravy přední nápravy, konstrukce a obslužný software předních enkodérů a použité odometrické modely. Poslední část se zabývá zpracováním a vyhodnocením naměřených dat.

KLÍČOVÁ SLOVA

robot, odometrie, enkodér, Ackermannovo řízení, přední náprava

ABSTRACT

Aim of this thesis is to design and construct odometric sensors for a mobile robot with Ackermann steering Bender 2 and to design a mathematical model which would evaluate the trajectory of the robot using measured data of these sensors.

The first part summarizes theoretical knowledge, while the second, the practical part, describes the design of the front axle, the design and the operating software of the front encoders and the odometric models. The last part deals with the processing and evaluation of the measured data.

KEYWORDS

robot, odometry, encoder, Ackermann steering, front axle

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PORTEŠ, P. *Návrh a realizace odometrických snímačů pro mobilní robot s Ackermannovým řízením*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 74 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Hrbáček.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Jana Hrbáčka a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 25. května 2017

.....

Petr Porteš

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Hrbáčkovi za cenné rady a ochotu poradit při tvorbě práce. Poděkování patří i dalším členům Bender Robotics za rady a náměty při psaní kódu a návrhu konstrukčních úprav robota. Poděkování patří i mé rodině a nejbližším, kteří mi po celou dobu byli oporou.

OBSAH

ÚVOD	11
1 ROBOT BENDER 2	12
1.1 TOPOLOGIE ŘÍZENÍ.....	13
2 ACKERMANNNOVO ŘÍZENÍ	14
3 SNÍMAČE UJETÉ VZDÁLENOSTI	16
3.1 OPTICKÝ INKREMENTÁLNÍ ENKODÉR	16
3.2 MAGNETICKÝ ENKODÉR	16
3.3 ABSOLUTNÍ ENKODÉR.....	17
3.4 RESOLVER	17
3.5 MAGNETICKÝ SNÍMAČ NATOČENÍ	18
4 KONSTRUKČNÍ ÚPRAVY PŘEDNÍ NÁPRAVY	19
4.1 MINIMALIZACE VŮLÍ	19
4.2 ÚPRAVY NÁBOJŮ KOL	21
4.3 UCHYCENÍ A NÁVRH ENKODÉRŮ	21
4.4 NÁVRH GEOMETRIE ŘÍZENÍ	23
5 IMPLEMENTACE ENKODÉRŮ A ODOMETRICKÉHO MODELU	27
5.1 VÝVOJOVÁ DESKA NUCLEO F303K8.....	27
5.2 VÝBĚR ENKODÉRŮ	27
5.3 ZAPOJENÍ ENKODÉRŮ	28
5.4 SBĚR, PŘIJÍMÁNÍ A ODESÍLÁNÍ DAT Z ENKODÉRŮ	29
5.4.1 <i>Sčítání hran</i>	29
5.4.2 <i>Ochrana proti ztrátě kroku</i>	30
5.4.3 <i>Přijímání a odesílání dat</i>	32
5.5 ODOMETRICKÝ MODEL	33
5.5.1 <i>Střed na normále zadních kol</i>	34
5.5.2 <i>Střed z poměru ujeté vzdálenosti kol</i>	35
5.5.3 <i>Střed z rozdílu ujeté vzdálenosti kol</i>	37
5.5.4 <i>Střed zatáčení jako průsečík tří kružnic</i>	40
5.5.5 <i>Změna polohy robota při známé poloze středu zatáčení</i>	42
5.5.6 <i>Změna polohy robota z posuvů kol</i>	43
6 MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ DAT	46
6.1 KALIBRACE ENKODÉRŮ	46
6.2 FILTRACE DAT	48
6.2.1 <i>Převzorkování</i>	48
6.2.2 <i>Omezení maximální rychlosti</i>	48
6.2.3 <i>Detekce stojícího robota</i>	48
6.2.4 <i>Ochrana proti opačnému smyslu otáčení kol</i>	49
6.2.5 <i>Omezení maximálního zrychlení</i>	49
6.2.6 <i>Vyhlazení signálu</i>	49
6.2.7 <i>Kontrola správnosti smyslu zatáčení</i>	49
6.3 CHARAKTERISTIKA ŘÍZENÍ.....	50
6.4 VYHODNOCENÍ ODOMETRICKÝCH MODELŮ	53

6.4.1	<i>Měření na asfaltu s původními koly</i>	54
6.4.2	<i>Měření na dlažbě s původními koly</i>	59
6.4.3	<i>Měření na dlažbě s koly Arsenal</i>	62
6.4.4	<i>Měření na trávě s původními koly</i>	64
6.4.5	<i>Měření na trávě s koly Arsenal</i>	66
ZÁVĚR		68
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ		71
SEZNAM PŘÍLOH		74

ÚVOD

V současné době je v oblasti umělé inteligence trendem automatizace nejrůznějších procesů, a to jak těch jednodušších, tak i složitějších, jako jsou například dnes velmi populární autonomní vozidla. Automobilky (ale i jiné společnosti, jako například Google) investují obrovské částky do vývoje v této oblasti s vizí, že za několik let již takřka nenajdeme vůz ovládaný řidičem.

Autonomní vozidla se začala objevovat v 80. letech. Jeden z prvních úspěšných projektů zaštiťovala automobilka Mercedes Benz, která přepracovala jednu ze svých dodávek na autonomní vůz, který dokázal samostatně jezdit po prázdných ulicích. V roce 1987 bylo laboratoří HRL Laboratories představeno první autonomní vozidlo schopné jezdit i po přírodních cestách. [1]

V roce 2004 vyhlásila americká agentura ministerstva obrany pro pokročilé výzkumné projekty (DARPA) poprvé soutěž autonomních vozidel ve velmi náročných podmínkách (150 mil cestami v poušti). Ačkoliv v prvním ročníku soutěž nikdo nedokončil, v druhém již byli účastníci výrazně úspěšnější. V dalších letech byla soutěž vyhlášena pro jízdu městskými ulicemi, poté byla pořádána soutěž humanoidních robotů a později soutěž pásových vozidel. [2], [3]

Dnes jsou průkopníky autonomního řízení především Google a Tesla, přidávají se ale i jiní, jako například Mercedes nebo Ford. Ani dnešní autonomní automobily však nejsou natolik dokonalé, aby mohly z trhu vytlačit člověkem řízená auta.

Před deseti lety vznikl na Fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně projekt, jehož cílem bylo navrhnout a sestavit mobilního autonomního robota pro účely výzkumu v této oblasti. Cíle se podařilo splnit a robot, pojmenovaný Bender 2, byl přihlášen do soutěže Robotour. Robotour je původem česká soutěž autonomních robotů, ve které je cílem projet definovanou trasu a přepravit 5 kg těžký náklad. Bender se soutěže zúčastnil v letech 2007-2009. Nejlepším dosaženým umístěním bylo 5. místo v roce 2009. [4]

V roce 2014 začaly práce na renovaci robota. Byl vyměněn řídicí počítač, přepracován řídicí software a bylo rozhodnuto o implementaci nových lokalizačních senzorů. Společně s obměnou senzorů byly navrženy i nové algoritmy na zpracování dat.

Do projektu jsou momentálně zapojeni i další studenti mechatroniky a automatizace, kteří mimo jiné pracují na implementaci a zlepšení funkčnosti GPS navigace, akcelerometru a laserového dálkoměru.

Účelem této diplomové práce bylo vylepšit lokalizační schopnosti robota implementováním odometrických snímačů a algoritmů zpracování jejich signálu. Zlepšení schopností lokalizace by mělo robotu pomoci k úspěchu v letošním ročníku soutěže Robotour, kam byl Bender opět přihlášen.

1 ROBOT BENDER 2

Robot Bender 2 je mobilní autonomní robot, který byl vyvinut za účelem rozvoje autonomní robotiky. Kostrou tohoto čtyřkolového robota s Ackermannovým řízením je svařený hliníkový rám. Přední kola jsou řízena modelářským servomotorem, pohon je zajištěn dvěma motory Maxon o výkonu 150W, které zároveň slouží jako elektronický diferenciál. Celá zadní část je připevněna na kyvné konzoli, která robotu umožňuje hladší průjezd přes nerovné povrchy. Robot je napájen dvěma 12V olověnými bateriemi. K dispozici jsou dvě odlišné sady kol (sadu Arsenal lze vidět na **Obr. 1**, původní sadu na **Obr. 45**).

Bender je osazen množstvím lokalizačních čidel. Nejviditelnějším z nich je laserový dálkoměr SICK, který počítá vzdálenost objektů podle času, za který se emitovaný paprsek vrátí. Kola jsou osazena rotačními optickými enkodéry. Robot dále disponuje GPS modulem, kompasem, gyroskopem, akcelerometrem a videokamerou.



Obr. 1 Robot Bender 2 osazený koly Arsenal

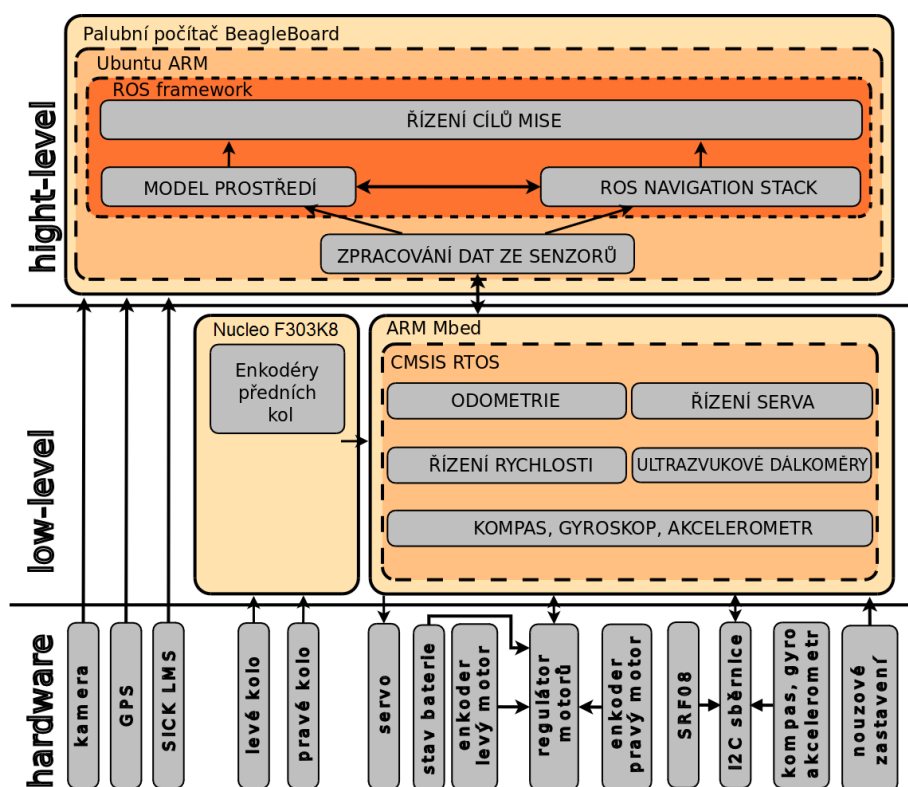
1.1 TOPOLOGIE ŘÍZENÍ

Řízení robota je rozděleno do dvou vrstev – low-level a high-level.

Low-level má na starosti kompletní obsluhu hardware. Stará se o řízení směru a rychlosti robota, sběr a zpracování dat ze senzorů a veškerou komunikaci mezi zařízeními. Platformou, obsluhující low-level řízení, je ARM Mbed NXP LPC1768.

High-level řízení se stará o složitější úkoly než low-level. Jeho úkolem je především plánování pohybu robota, zabývá se ale i zpracováním výpočetně náročnějších úloh jako například výpočty algoritmů odometrie. Je zřejmé, že high-level řízení vyžaduje výrazně vyšší výpočetní výkon, než low-level. Ten poskytuje jednodeskový počítač Beagle Board.

Oba systémy jsou na sobě zcela nezávislé a informace mezi sebou sdílí pomocí komunikačního protokolu. [5]

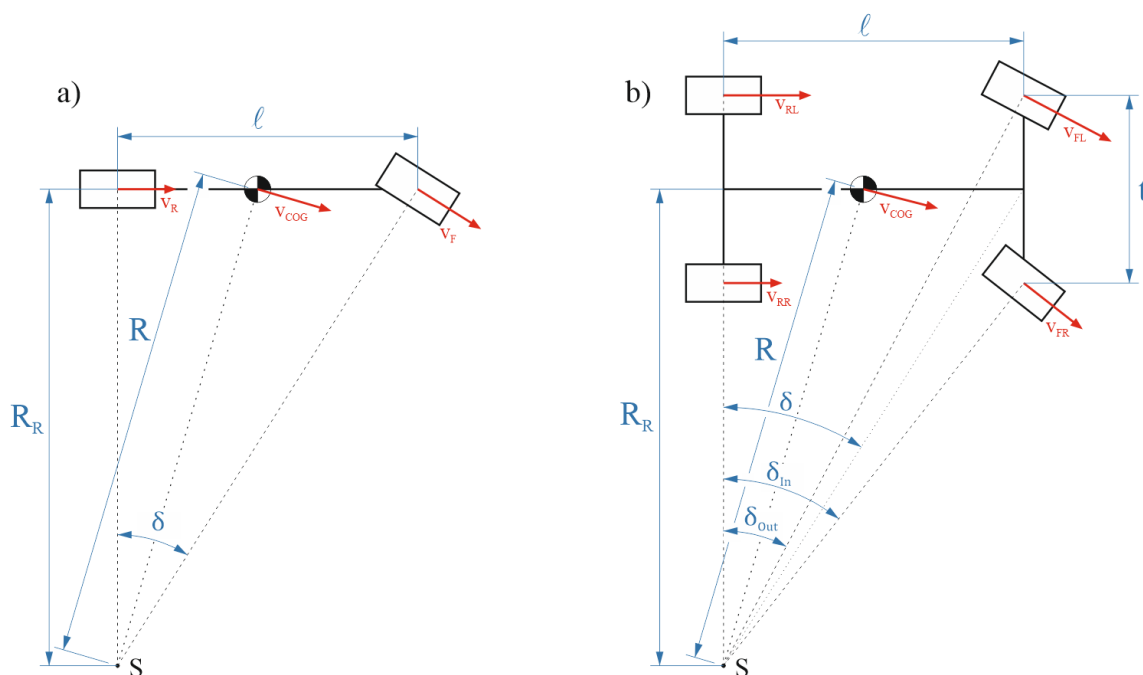


Obr. 2 Topologie řízení robota Bender 2 [5]

2 ACKERMANNOVO ŘÍZENÍ

Geometrie řízení má zásadní vliv na chování vozidla v zatáčkách. Pro různé typy aut je vhodný jiný typ geometrie. Jedním ze základních typů jsou např. Ackermannovo řízení, paralelní řízení nebo reverzní Ackermannovo řízení. Ackermannovo řízení je takové, kdy se normály všech kol při zatáčení protínají v jednom bodě. Používá se především pro případy, kdy je rychlost vozidla malá a je možné zanedbat prokluz kol. Paralelní řízení není v praxi moc časté a používá se např. pro jednoduché dálkově ovládané modely vozů. Reverzní Ackermannovo řízení lze často vidět v profesionálním motorsportu. [6], [7]

Omezme se nyní na 2-rozměrný případ Ackermannova řízení pro jednostopá vozidla, zanedbejme prokluz pneumatik během zatáčení a uvažujme ustálený stav¹ (**Obr. 3**). Při natočení kola vůz zatáčí okolo tzv. středu zatáčení vozidla S s poloměrem R .



Obr. 3 Jednostopý (a) a dvoustopý (b) model Ackermannova řízení

Trajektorii vozidla určuje tzv. Ackermannův řídící úhel δ , který je dle (1) roven podílu rozvoru vozidla l a poloměru zatáčení vztaženému k zadním kolům R_R . Skutečný poloměr zatáčení R (tedy vzdálenost mezi těžištěm vozidla a středem zatáčení S) lze aproximovat hodnotou R_R . U jednostopého vozidla se řídící úhel rovná úhlu natočení předního kola. Rozšíříme-li model na dvoustopé vozidlo, lze vypočítat úhly natočení jednotlivých kol jako (2) a (3), kde δ_{in} a δ_{out} je úhel natočení vnitřního, resp. vnějšího kola a t je rozchod kol.

$$\delta = \frac{l}{R_R} \cong \frac{l}{R} \quad (1)$$

¹ Stav, kdy vozidlo zatáčí za stálého poloměru a všechny síly působící na vozidlo jsou statické.

$$\delta_{In} = \frac{l}{R_R - \frac{t}{2}} \cong \frac{l}{R - \frac{t}{2}} \quad (2)$$

$$\delta_{Out} = \frac{l}{R_R + \frac{t}{2}} \cong \frac{l}{R + \frac{t}{2}} \quad (3)$$

Navrhnout geometrii tak, aby ve všech pracovních úhlech natočení kol respektovala přesně geometrii Ackermannova řízení, není jednoduše možné. Její dostatečnou aproximaci je však možno vytvořit zavazbením předních kol čtyřkloubovým mechanismem lichoběžníkovitého tvaru, jak je vidět na **Obr. 4**.



Obr. 4 Čtyřkloubový mechanismus aproximující ideální Ackermannovo řízení

Pohybuje-li se vozidlo nezanedbatelnou rychlostí, není možné zanedbat setrvačné síly, působící na vozidlo, které způsobují prokluz kol během zatáčení

Reálné vozidlo s Ackermannovým řízením zatáčí kolem již zmiňovaného středu zatáčení pouze v případě, kdy se jeho rychlost limitně blíží nule. Při nenulové rychlosti bychom totiž museli zanedbat prokluz kol během zatáčení. V tomto případě by ale pneumatika nepřenese žádnou boční sílu a vozidlo by jelo rovně. Řízení se v těchto případech navrhuje vzhledem k vlastnostem pneumatik a celý model je potom výrazně složitější. Síly, které pneumatiky přenáší, se nejčastěji počítají algoritmem Pacejka's Magic Formula. [7], [8], [9]

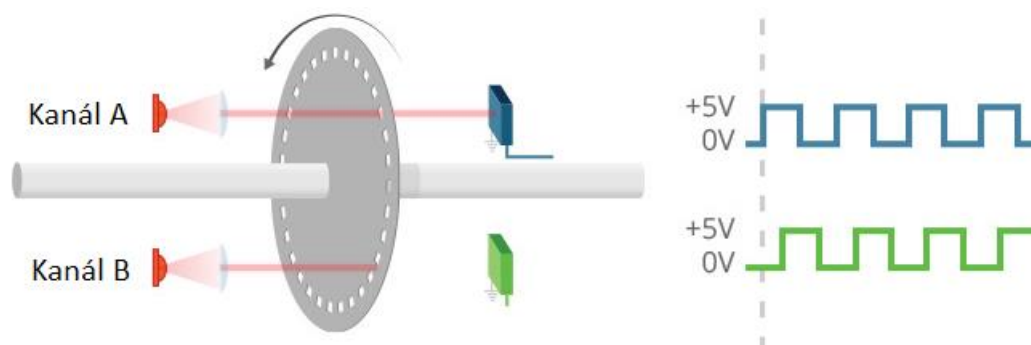
3 SNÍMAČE UJETÉ VZDÁLENOSTI

3.1 OPTICKÝ INKREMENTÁLNÍ ENKODÉR

Inkrementální enkodér, je zařízení, které ke snímání polohy využívá detekci periodicky se opakujícího vzoru na snímaném objektu. Nejčastěji se používá kombinace světelné závorý a děrovaného pásu jako stínítka, existují ale i jiná konstrukční řešení, jako například optický snímač s odrazkami na snímaném objektu.

Snímač na základě svého logického stavu generuje jako výstup logickou nulu, resp. jedničku. Takto můžeme detekovat vzestupnou (přechod $0 \rightarrow 1$), resp. sestupnou (přechod $1 \rightarrow 0$) hranu a jejich sčítáním získat informaci o natočení nebo posunutí.

Problém však nastane v okamžiku, kdy dojde ke změně směru. Pokud použijeme pouze jednu optickou závoru, nejsme schopni získat informaci o směru. Tuto informaci lze ale získat použitím dvou optických snímačů, které jsou vůči sobě fázově posunuty o $\frac{\pi}{2}$. Takovému enkodéru se říká kvadrurní.



Obr. 5 Inkrementální enkodér v kvadrurním uspořádání (vlevo) a výstupní signál ze světelných závor (vpravo) [10]

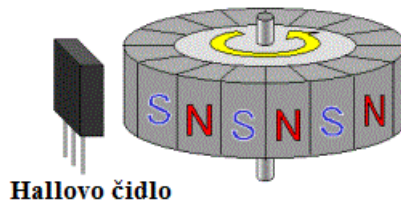
Na základě toho, zda u kvadrurního enkodéru detekujeme pouze jeden, nebo oba typy hran, získáváme buď dvojnásobné, nebo čtyřnásobné rozlišení enkodéru vůči počtu pulsů v jednom signálu. [11]

Je možné se setkat i s enkodéry v 3-kanálovém provedení. Třetí kanál zde slouží k detekci nulové (výchozí) pozice natočení hřídele. [12]

3.2 MAGNETICKÝ ENKODÉR

Tento typ senzoru pro svoji funkci využívá Hallova jevu. Je-li vodič protékán proudem umístěn v magnetickém poli, magnetické pole způsobí sílu, která vytlačí nosiče náboje na boční stranu vodiče. Po stranách vodiče pak vzniká měřitelné napětí. Hallův efekt je znatelnější při použití polovodičů, nejčastěji typu P.

Snímač pracuje na podobném principu, jako senzor optický, jediným rozdílem je, že signál nevzniká přerušením světelného paprsku, ale průchodem magnetu kolem Hallova čidla. Magnety jsou rozmístěny po obvodu snímaného objektu, jak je vidět na Obr. 6. Rozlišení senzoru je dáno počtem pólových dvojic. [12]



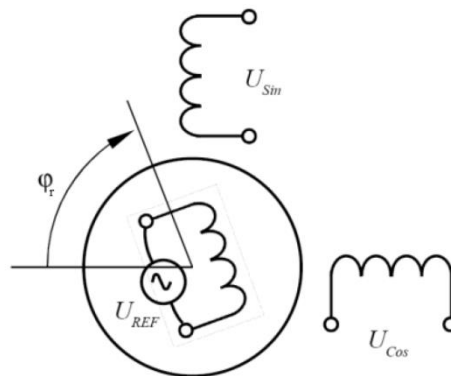
Obr. 6 Uspořádání enkodéru využívajícího Hallova jevu [13]

3.3 ABSOLUTNÍ ENKODÉR

Absolutní enkodér na rozdíl od inkrementálního nevyhodnocuje relativní, ale absolutní polohu. Obvykle mívá alespoň 4 kanály, které snímají každý na jiném poloměru kódovacího kruhu. Kódovací kruh je navržen tak, aby při každém natočení měl unikátní kombinaci výstupních signálů na všech kanálech. Rozlišení absolutního enkodéru o n kanálech lze stanovit jako 2^n dílků na 1 otočení.

3.4 RESOLVER

Resolver je snímač natočení využívající principu rotačního transformátoru. Stator se skládá ze dvou cívek fázově posunutých o $\frac{\pi}{2}$, rotor z cívky napájené sinusovým napětím U_{REF} s amplitudou U_r . Rotorová cívka mění otáčením svoji magnetickou vazbu na statorové cívky, čímž se mění amplitudy transformovaných napětí U_{Sin} a U_{Cos} . Z těchto lze pomocí rovnic (4) - (7) zjistit absolutní polohu φ_r . [14]



Obr. 7 Princip funkce resolveru [14]

$$U_{REF} = U_r \cdot \sin(\omega t) \quad (4)$$

$$U_{Sin} = U_s \cdot \sin(\omega t) \cdot \sin(\varphi_r) \quad (5)$$

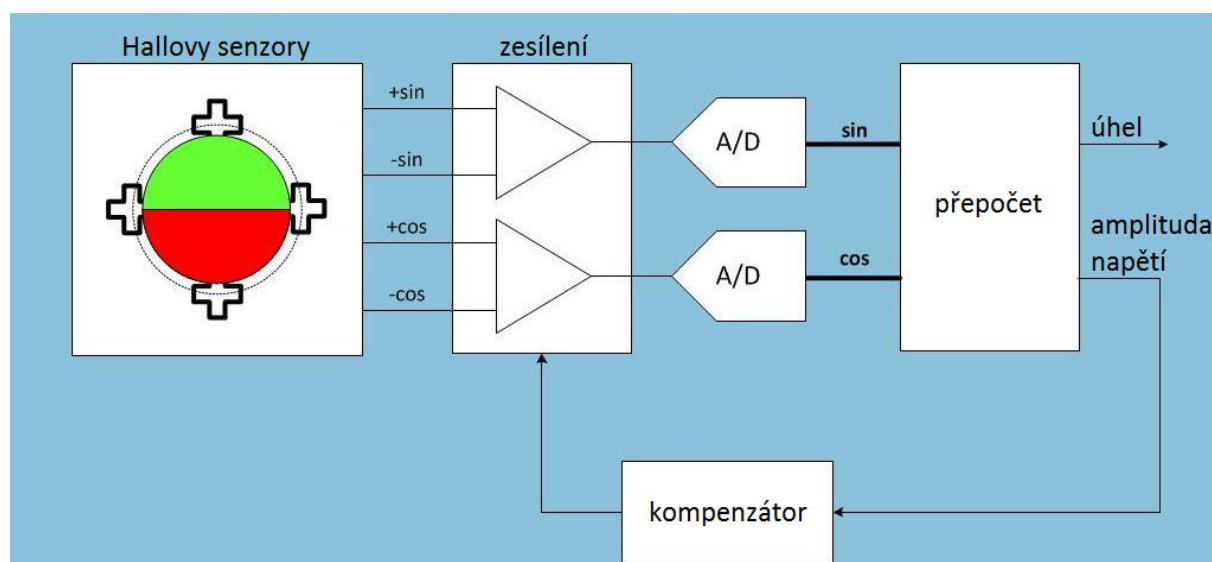
$$U_{Cos} = U_s \cdot \sin(\omega t) \cdot \cos(\varphi_r) \quad (6)$$

$$\varphi = \arctan \frac{U_{Sin}}{U_{Cos}} \quad (7)$$

Nevýhodou resolveru je velká citlivost na šum. Bez filtrace nebo použití speciálních softwarových pozorovatelů by nebylo možné odečíst polohu. [14]

3.5 MAGNETICKÝ SNÍMAČ NATOČENÍ

Magnetický snímač natočení opět využívá Hallova jevu. Poloha je zjišťována na základě naměřeného napětí na dvou fázově posunutých Hallovyých senzorech. Tímto způsobem lze dosáhnout přesnosti měření až na desetiny stupně. [15]



Obr. 8 Princip magnetického snímače natočení [16]

U komerčních magnetických snímačů se nejčastěji setkáme s uspořádáním se 4 Hallovyými čidly, které jsou pravidelně rozmístěny okolo hřídele. Protilehlé senzory dávají vždy inverzní signál – jejich odečtením dojde k zesílení a tím i k zvýšení přesnosti měření. Po zesílení napěťové hladiny je sinový i cosinový signál digitalizován a vypočten (stejným způsobem jako u resolveru) úhel a dále amplituda napětí. Její hodnota slouží k zpětnovazební regulaci zesilovače. [16]

4 KONSTRUKČNÍ ÚPRAVY PŘEDNÍ NÁPRAVY

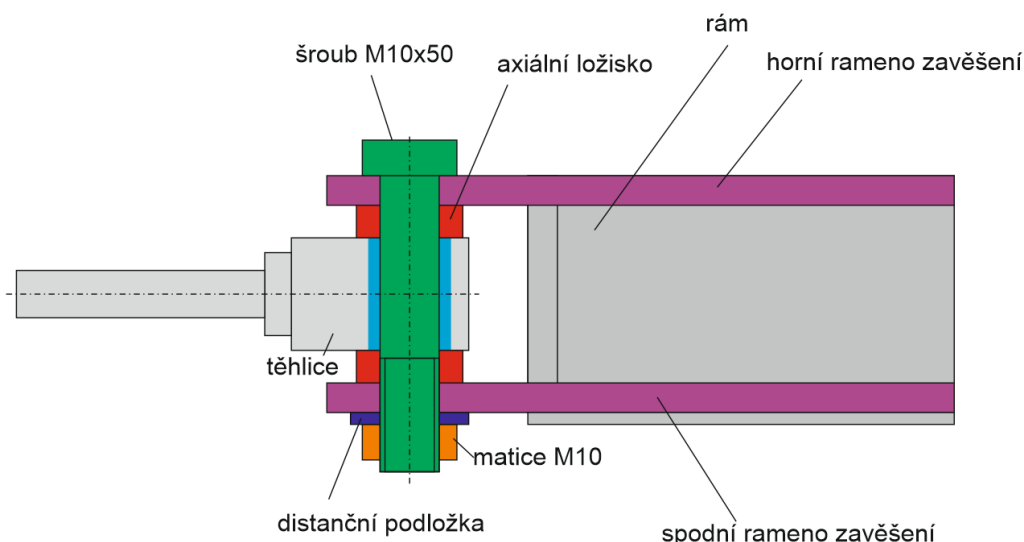
Proces odometrie, tedy proces popisující polohu a orientaci robota, vychází v případě robota Bender 2 z rovinného dvoustopého modelu vozidla. Tento model mimo jiné zanedbává vůle v čepech a kloubech, bez nichž by ovšem nebyl možný pohyb. Aby byla odometrie co nejpřesnější, je vhodné vůle minimalizovat.

Přední náprava robota Bender 2 byla navržena tak, aby radiální pohyb byl realizován pomocí válcových čepů uložených s vůlí. Toto řešení je konstrukčně jednoduché, avšak nevýhodou jsou poměrně velké vůle v čepech. Proto jsem navrhnul nové řešení uložení za pomoci ložisek a kulových čepů, které se vyznačují téměř nulovou vůlí.

Kromě minimalizace vůlí jsem navíc navrhnul novou geometrii řízení robota, které by mělo být blíže Ackermannovu řízení, než to původní.

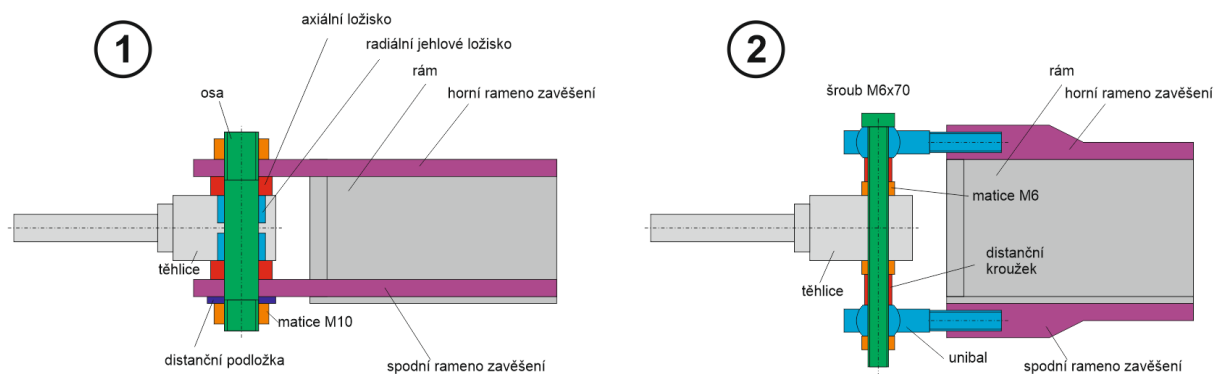
4.1 MINIMALIZACE VŮLÍ

Na **Obr. 9** je možné vidět původní řešení uložení těhlice (zobrazeno v řezu zepředu), která se otáčela podél osy šroubu díky vůlí. Modře zobrazená oblast zobrazuje hlavní zdroj vůlí.



Obr. 9 Původní řešení uložení těhlice

Na dalším obrázku (**Obr. 10**) lze vidět dvě mnou navržená řešení zmenšení vůle. V návrhu č.1 jsou do těhlice nalisována dvě souosá jehlová ložiska, ve kterých je uložen čep. Ten je přišroubován k hornímu rameni zavěšení a za použití dvou axiálních ložisek přitažen k dolnímu rameni. Druhá varianta využívá unibalů (kloubových hlavice) pro realizaci otáčivého pohybu. Ty jsou našroubovány do horního, resp. spodního ramene zavěšení. Těhlice je k unibalům přišroubována přes distanční kroužky.



Obr. 10 Nová řešení uchycení těhlice zmenšující vůli

Výhodou prvního řešení je především robustnost a zachování světlé výšky, která by se v druhém případě snížila o 10 mm. U prvního návrhu by navíc bylo zapotřebí vyrobit pouze horní rameno zavěšení, které by mělo stejnou geometrii, jako původní, avšak místo průchozí díry pro šroub (osu) by mělo vnitřní závit.

Druhé řešení by mělo přesněji vymezovat osu rotace kvůli velké vzdálenosti unibalů, díky které lze navíc očekávat menší vůli uložení. Vzhledem k omezenému prostoru v oblasti přední nápravy však lze použít unibaly s průchozí dírou v kuličce o průměru maximálně 6 mm. Použití šroubu M6 pak vůči prvnímu řešení silně snižuje odolnost nápravy. Další nevýhodou je nutnost vyrobit nová ramena zavěšení a především odstranit původní spodního rameno, které je svařené s rámem.

Po zvážení výhod i nevýhod obou řešení a poradě s konstruktérem a vedoucím práce jsem zvolil a realizoval první řešení.

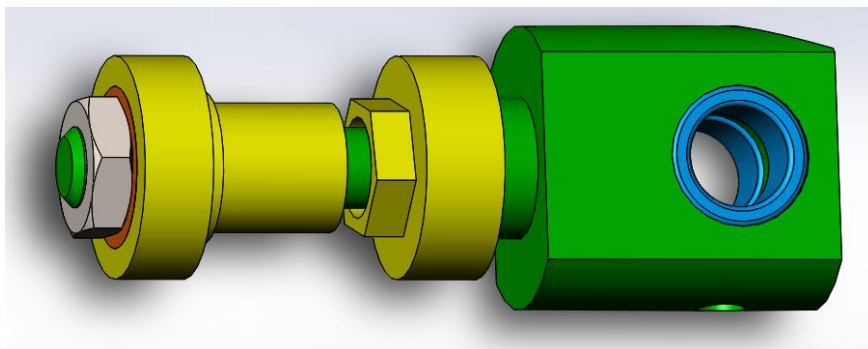


Obr. 11 Obrobené díly 1. řešení (vlevo ramena těhlice, uprostřed osy, vpravo těhlice)

4.2 ÚPRAVY NÁBOJŮ KOL

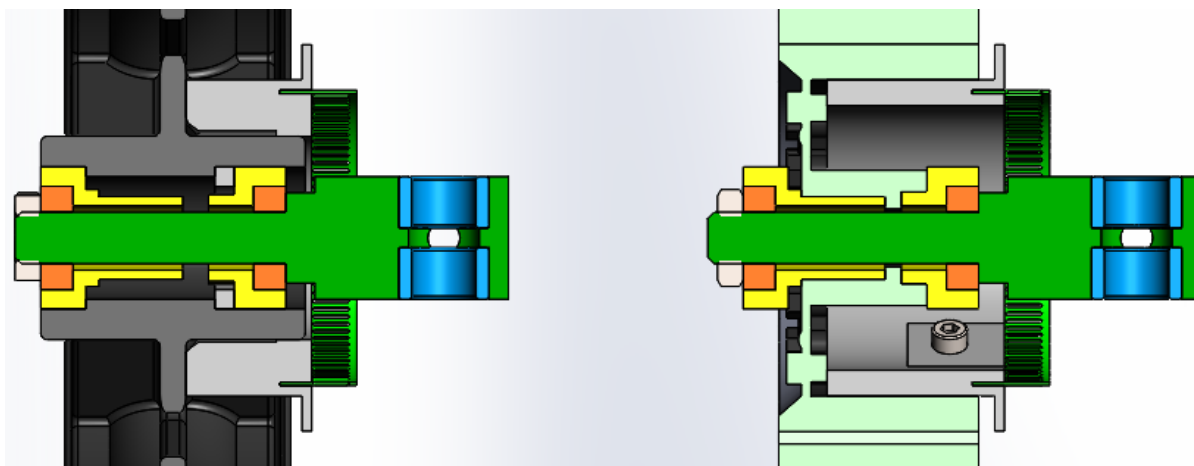
Další z úprav, které jsem na robotu Bender 2 provedl, se dotýká nábojů kol. Bender má k dispozici dvě různé sady kol. Tvar disků těchto kol je však natolik rozdílný, že nebylo možné jednoduše a rychle kola měnit. Aby byl tento problém odstraněn, navrhl jsem univerzální náboj pro obě sady kol.

Náboj je vytisknut z ABS plastu a skládá se ze dvou částí. V každé z nich je nalisováno radiální kuličkové ložisko.



Obr. 12 Univerzální náboj předních kol

U sady Arsenal jsem využil vnitřního šestihranného vybrání, do kterého pasuje první část univerzálního náboje. Druhá část náboje je ke kolu upevněna nasunutím válcové plochy menšího poloměru do průchozí díry v kole. U sady původních předních kol jsou obě části náboje nasunuty větší válcovou plochou do děr v ose kola.



Obr. 13 Uložení původního kola (vlevo) a kola Arsenal (vpravo) v řezu

4.3 UCHYCENÍ A NÁVRH ENKODÉRŮ

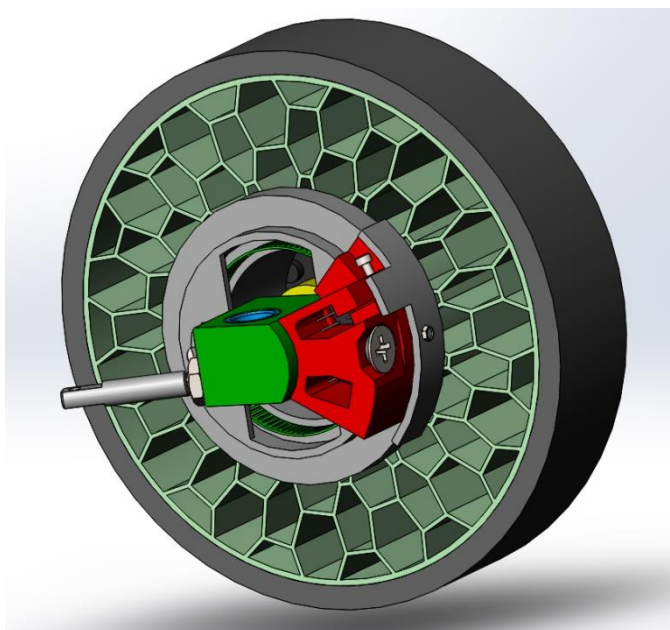
Dalším bodem úprav přední nápravy bylo osazení předních kol enkodéry. Obdobně, jako v případě nábojů by měly být navrženy univerzálně pro obě kola.

Enkodér byl dimenzován tak, aby svou velikostí vyhovoval oběma sadám kol a aby nebyl prostorově příliš výrazný. Jak je vidět z **Obr. 13**, profil původního kola nijak neomezuje průměr děrovaného pásu enkodéru. Průměr pásu 45 mm byl zvolen s ohledem na tvar kola

Arsenal tak, aby byl pásek zalisován v oblasti vybrání. Pro uchycení pásku v původním kole bylo využito vnější válcové plochy a byly přidány otvory na výztužná žebra. U kol Arsenal bylo naopak pro uchycení využito vnitřní válcové plochy. Držák pásku je navíc opatřen o stínítko pro zlepšení funkčnosti světelných závor.

Pásy enkoderů byly vyrobeny ve třech variantách, a to s 25, 50 a 100 děrami. Jelikož závory nebyly schopny detekovat změny svého logického stavu u varianty se sto děrami, byly použity pásy s 50 děrami. Enkodér osazený tímto páskem je schopen detekovat pootočení kola o $1,8^\circ$, což u původního kola znamená ujetou dráhu asi 2,3 mm, u kola Arsenal přibližně 2,1 mm.

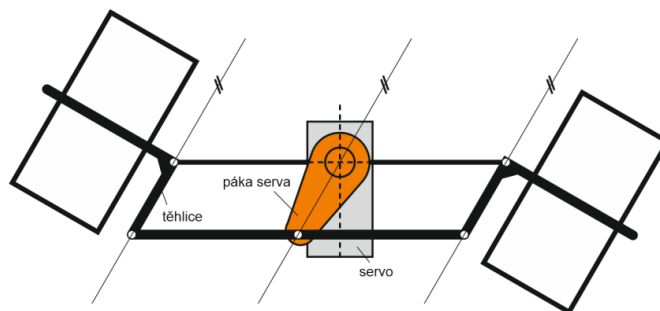
Držák světelných závor, doplněný o další stínítko a ochranu proti nečistotám, je přišroubován k těhlici. Držák je koncepčně navržen tak, aby co nejvíce stínil závory a aby umožňoval nastavení vzdálenosti závor, což je zaručeno rozpěrným šroubem.



Obr. 14 Kompletně osazené kolo Arsenal

4.4 NÁVRH GEOMETRIE ŘÍZENÍ

Původní geometrie řízení vycházela z podmínky rovnoběžnosti páky serva a ramen těhlic, jak je vidět na **Obr. 15**. To mělo za důsledek, že normály předních kol se při žádaném natočení nemohly protnout. Aby se dala kinematika robota co nejlépe a nejpřesněji modelovat, rozhodl jsem se co nejvíce přiblížit ideálnímu Ackermannovu řízení.

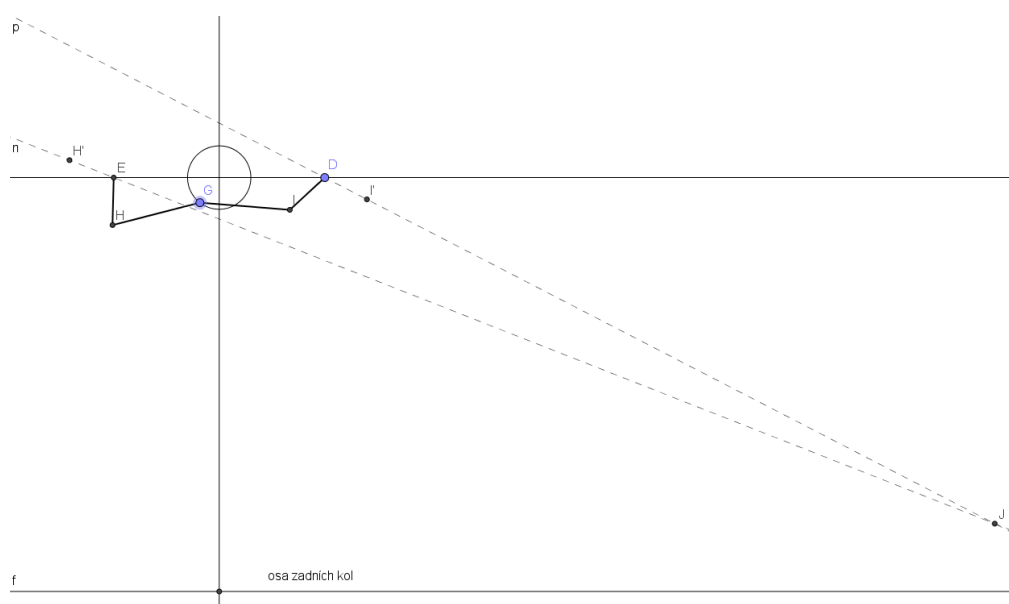


Obr. 15 Původní geometrie řízení

Pro návrh geometrie jsem použil program GeoGebra. Jedná se o volně stažitelný program umožňující geometrické modelování a zobrazení pohybu prvků v rámci jejich stupňů volnosti.

Aby nová geometrie co nejvíce respektovala Ackermannovo řízení, úhel mezi osou předního kola a ramenem těhlice musí být tupý. To by ale znamenalo, že by páka serva musela být spojena s řídicí tyčí pomocí vačky. Použití vačky by ale mělo za důsledek zvýšení vůlí řídicího mechanismu. Proto jsem se rozhodl řídicí tyč rozdělit na dvě půlky, tedy tyč spojující páku serva s ramenem těhlice každého kola (**Obr. 16**).

Po vytvoření modelu v GeoGebře jsem provedl optimalizaci délky ramene těhlice a úhlu tohoto ramene s osou kol. Cílem optimalizace bylo přiblížit průsečík normál předních kol co nejvíce normále zadních kol. Hledání nejvhodnějších parametrů probíhalo jejich manuálním nastavováním. Ukázka modelu je na **Obr. 16**. Bod *J* znázorňuje průsečík normál předních kol.

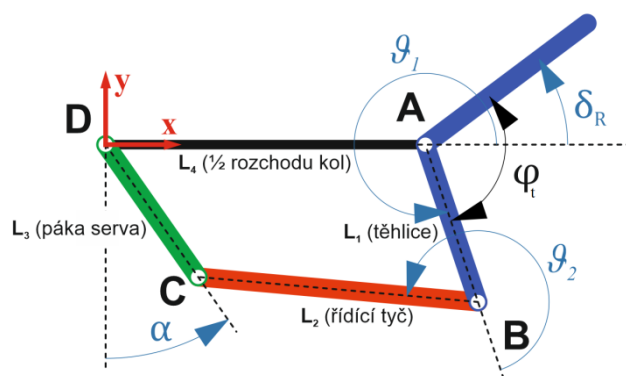


Obr. 16 Model nového řízení v GeoGebře

Abych získal funkci natočení jednotlivých kol v závislosti na úhlu natočení serva α (v pracovním rozsahu od -45° do 45°), namodeloval jsem geometrii v Matlabu. Matematický model je popsán níže.

Jádrem modelu je čtyřkloubový mechanismus z **Obr. 17** reprezentující vazby mezi řídícím servem a pravým kolem. Bod **D** reprezentuje osu rotace serva, bod **C** kloub mezi pákou serva a řídící tyčí, bod **B** rotační vazbu mezi řídící tyčí a ramenem těhlice a bod **A** osu rotace těhlice. Body **A** a **D** jsou fixně zavazbeny k souřadnému systému, úhel mezi osou předního kola a těhlicí φ_t je neměnný.

Úhel natočení pravého kola δ_R lze vypočítat dvěma způsoby. Prvním je spočítat souřadnice bodu **C** jako průsečík dvou kružnic se středy v bodech **B**, resp. **D** a poloměry L_2 , resp. L_3 . Po určení bodu **C** a vypočtení úhlu ϑ_1 se určí řídící úhel jako součet ϑ_1 a φ_t . Druhým způsobem je využití inverzního kinematického modelu čtyřkloubového mechanismu. Tím určíme úhel ϑ_1 , ze kterého se stejně, jako v předchozím případě vypočten řídící úhel.



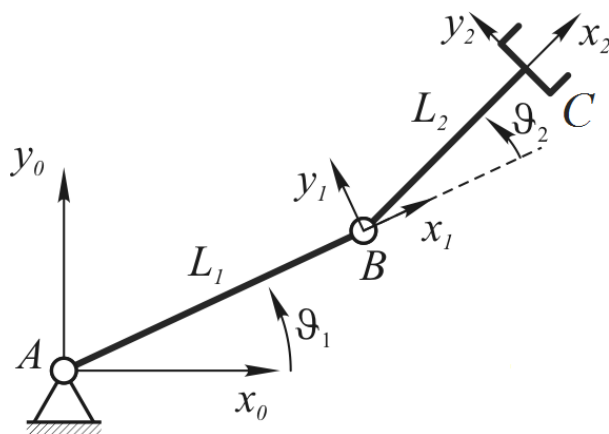
Obr. 17 Model natočení kol

Nejdříve je tedy potřeba vypočítat souřadnice² bodu **C**. Poloha je vypočtena z bodu **D**, proto je označen jako C_D a platí pro něj (8).

$$C_D = \begin{bmatrix} C_{Dx} \\ C_{Dy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_3 \sin \alpha \\ -L_3 \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (8)$$

Nyní přichází na řadu inverzní kinematický model, který iteračně spočte úhly ϑ_1 a ϑ_2 za užití inverzní Jacobiho matice (matice parciálních derivací) otevřeného dvoukloubového mechanismu (**Obr. 18**), který vznikl roztržením původního mechanismu v bodě **C**. [24]

² První prvek reprezentuje souřadnici x , druhý souřadnici y .



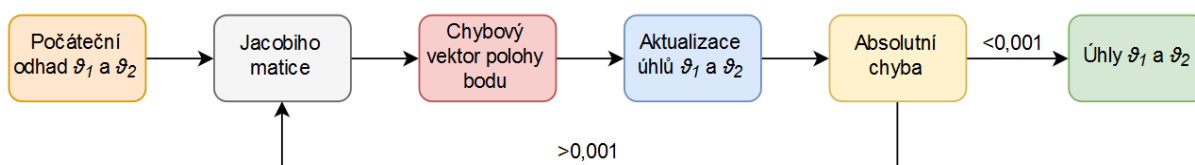
Obr. 18 Dvoukloubový mechanismus pro výpočet inverzní kinematiky [24]

Abychom mohli zahájit výpočet, potřebujeme být nejdříve schopni určit polohu bodu C pomocí úhlů ϑ_1 a ϑ_2 . Dle **Obr. 18** platí rovnice (9). Dále je vytvořen vektor ϑ (10).

$$\mathbf{C}_A = \begin{bmatrix} C_{Ax} \\ C_{Ay} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 \cos \vartheta_1 + L_2 \cos(\vartheta_1 + \vartheta_2) \\ L_1 \sin \vartheta_1 + L_2 \sin(\vartheta_1 + \vartheta_2) \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\vartheta = \begin{bmatrix} \vartheta_1 \\ \vartheta_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Výpočet probíhá podle schématu z **Obr. 19**. Nejdříve se zadá počáteční odhad polohy úhlů ϑ_1 a ϑ_2 , které se vloží jako argumenty do Jacobiho matice dvoukloubového mechanismu. Dále se vypočte chybový vektor $d\mathbf{x}$ polohy bodu C jako rozdíl vypočtených souřadnic (8) a (9). V takto vzniklé rovnici se nesmí opomenout transformace do hlavního souřadnicového systému (viz **Obr. 17**). Nyní se dle (13) spočte vektor $\Delta\mathbf{Q}$, obsahující informaci o změně úhlů ϑ_1 a ϑ_2 . Vektor ϑ se aktualizuje (14) a vypočte se absolutní chyba E (15), která se porovná s předem určenou hranicí³. Je-li chyba větší, než přednastavená hranice, spočítá se další iterace. Pokud je chyba menší, spočtené úhly ϑ_1 a ϑ_2 jsou považovány za výsledné. [24]



Obr. 19 Schéma algoritmu inverzní kinematiky čtyřkloubového mechanismu

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial C_{Ax}}{\partial \vartheta_1} & \frac{\partial C_{Ax}}{\partial \vartheta_2} \\ \frac{\partial C_{Ay}}{\partial \vartheta_1} & \frac{\partial C_{Ay}}{\partial \vartheta_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_1 \sin \vartheta_1 - L_2 \sin(\vartheta_1 + \vartheta_2) & -L_2 \sin(\vartheta_1 + \vartheta_2) \\ L_1 \cos \vartheta_1 + L_2 \cos(\vartheta_1 + \vartheta_2) & L_2 \cos(\vartheta_1 + \vartheta_2) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$d\mathbf{x} = \mathbf{C}_D - \mathbf{C}_A - \begin{bmatrix} L_4 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 \cdot \sin \alpha - L_1 \cos \vartheta_1 + L_2 \cos(\vartheta_1 + \vartheta_2) - L_4 \\ -L_1 \cdot \cos \alpha - L_1 \sin \vartheta_1 + L_2 \sin(\vartheta_1 + \vartheta_2) \end{bmatrix} \quad (12)$$

³ Hranici jsem zvolil 0,001mm.

$$\Delta \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \Delta \vartheta_1 \\ \Delta \vartheta_2 \end{bmatrix} = \mathbf{J}^{-1} d\mathbf{x} \quad (13)$$

$$\boldsymbol{\vartheta} = \boldsymbol{\vartheta} + \Delta \mathbf{Q} \quad (14)$$

$$E = \sqrt{dx_1^2 + dx_2^2} \quad (15)$$

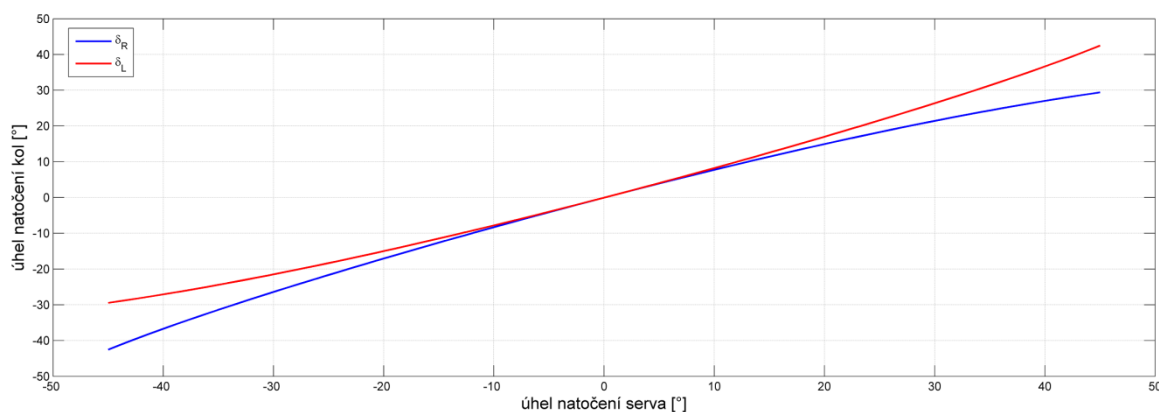
Jakmile jsou spočteny souřadnice bodu **C** a úhly ϑ_1 a ϑ_2 , zbývá dopočítat úhel natočení kola δ_R . Vzhledem ke geometrickému uspořádání z **Obr. 17** lze napsat rovnici (16).

$$\delta_R = \vartheta_1 + \varphi_t \quad (16)$$

Úhel natočení levého kola lze získat stejným způsobem, jako pravého s rozdílem, že do rovnic (9)-(16) bude namísto úhlu α dosazen úhel $-\alpha$ a nakonec se výsledná hodnota úhlu vynásobí hodnotou -1 (17).

$$\delta_L(\alpha) = -\delta_R(-\alpha) \quad (17)$$

Nyní můžeme vykreslit závislost řídicího úhlu kol na úhlu natočení serva (**Obr. 20**).



Obr. 20 Charakteristika řídicích úhlů kol

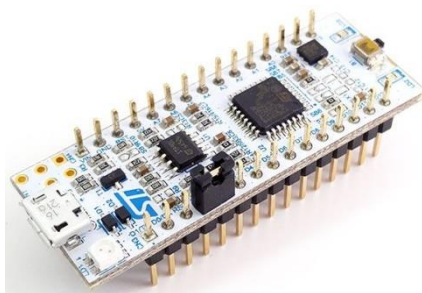
5 IMPLEMENTACE ENKODÉRŮ A ODOMETRICKÉHO MODELU

Tato kapitola se bude věnovat popisu hardware a software, který byl použit pro účely odometrie. Bude vysvětleno, jakým způsobem se dekódují vstupy z optických závor a jak komunikuje mikrokontrolér určený pro dekódování s ostatními zařízeními. Dále bude popsán kinematický model robota včetně algoritmu pro určení trajektorie robota za použití dat z enkodérů a informací o natočení řídicího serva.

5.1 VÝVOJOVÁ DESKA NUCLEO F303K8

Nucleo F303K8 je vývojová deska navržená a vyrobená společností ST. Je osazena 32-bitovým ARM Cortex-M4 procesorem s kmitočtem až 72MHz, vysokorychlostní vestavěnou pamětí a množstvím nejrůznějších periférií (I2C, SPI, USART, USB, CAN, PWM ADC...), díky čemuž má široké uplatnění pro různé aplikace. [17]

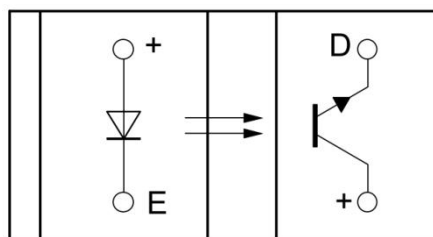
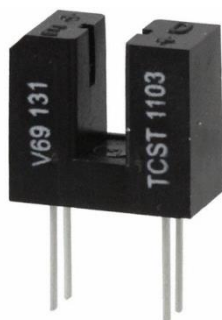
Pro účely této diplomové práce jsem zařízení použil k zpracování dat z optických závor a následné přeposlání do nadřazeného zařízení, kde bude probíhat výpočet odometrie. Kód byl psán v jazyce C++ v online vývojovém prostředí ARM Mbed.



Obr. 21 Platforma Nucleo F303K8 [18]

5.2 VÝBĚR ENKODÉRŮ

Při návrhu uspořádání přední nápravy bylo nutné dbát na omezený prostor kolem kol, který byl limitován geometrií nápravy. Jelikož komerčně dostupné enkodéry nebo jiné snímače natočení jsou rozměrově poměrně velké a pro danou aplikaci zbytečně drahé, vydal jsem se cestou sestavení vlastních enkodérů za pomoci běžně dostupných světelných závor. Hlavním požadavkem na výběr vhodných závor byl dostatečně malý rozměr, aby jejich implementace nebyla z konstrukčního hlediska příliš komplikovaná. Na základě těchto požadavků jsem zvolil závory TCST 1103.



Obr. 22 Světelná závora TCST 1103 [19] a její schéma vývodů (pohled shora) [20]

Aby byla umožněna detekce změny směru, bylo potřeba použít dvě světelné závory na každé kolo osazené enkodérem (kvadrurní režim), dohromady tedy čtyři. Závory jsem označil jako $L1$, $L2$, $R1$, resp. $R2$. Písmeno zde označuje příslušné kolo, číslo pořadí závor⁴.

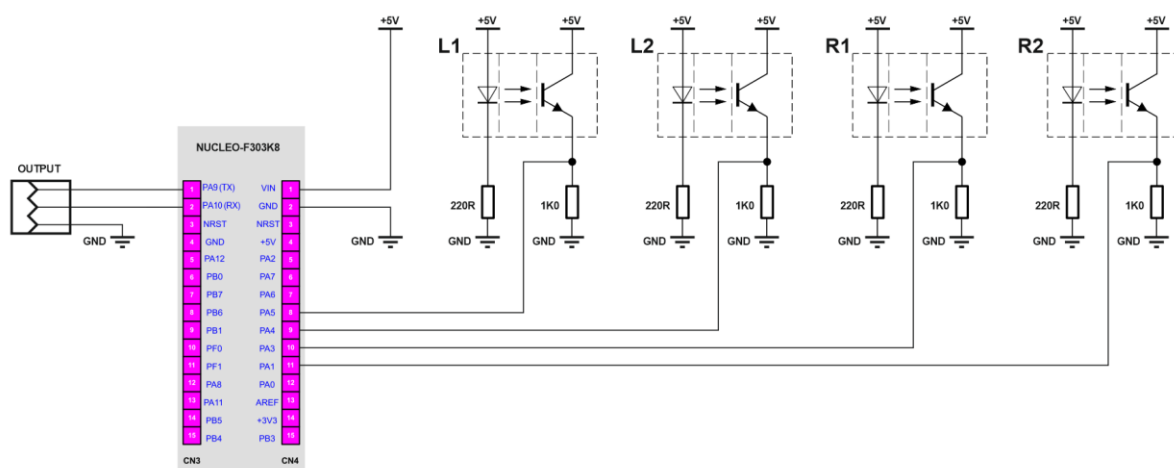
Na zadní nápravě robota Bender 2 byly již dříve instalovány komerčně dostupné enkodéry HEDS 5540. Jedná se o 3 – kanálové optické enkodéry s rozlišením 500 dílků na 1 otočku vyrobené firmou Broadcom Limited [21]. Rozlišení enkodéru je navíc zvýšeno použitím planetové převodovky s převodovým poměrem 43:1 a finálním převodem (poměr 3:2), díky čemuž je nepoměrně přesnější vůči předním enkodérům. Jelikož tyto enkodéry dosud fungovaly spolehlivě, nebyl důvod je měnit ani do nich jakkoli zasahovat.



Obr. 23 Enkodér zadních kol HEDS 5540 [22]

5.3 ZAPOJENÍ ENKODÉRŮ

Enkodéry jsou zapojeny do vývojové desky Nucleo F303K8, který zpracovává vstupní signál ze světelných závor. Nucleo pak komunikuje s nadřazeným zařízením pomocí sériového portu. Schéma zapojení modulu je realizováno dle schématu níže (**Obr. 24**).



Obr. 24 Schéma zapojení modulu pro získávání dat z enkodérů

⁴ Označení 1 nese závora, jejíž fáze předbíhá druhou závoru o $\frac{\pi}{2}$

Celý modul (včetně optických závor) je napájen stejnosměrným napětím 5V. Rezistor $220R$ za infračervenou diodou byl volen s ohledem na požadovaný proud⁵ mezi 15 a 20mA. Pro diodu lze napsat rovnici (18), ve které je U napájecí napětí, U_D úbytek napětí na diodě, R_Ω odpor rezistoru a I protékající proud. Nejbližší běžně dostupný rezistor pro požadovaný proud tekoucí diodou je $220R$.

$$U = R_\Omega I + U_D \rightarrow R_\Omega = \frac{U - U_D}{I} = \frac{5 - 1,5}{0,015} = 233\Omega \quad (18)$$

Fototranzistor je napájen 5V a jeho emitor uzemněn rezistorem $1K\Omega$. Tento rezistor zároveň slouží jako pull-down rezistor pro logický vstup do platformy Nucleo. K Nucleu jsou nakonec na piny $PA9$ a $PA10$ připojeny vodiče pro sériovou komunikaci (TX pro odchozí a RX pro příchozí data). Linky TX a RX jsou navíc doplněny o referenční hladinu logické nuly (GND).

Fyzické provedení desky plošného spoje lze vidět na **Obr. 25**. Pro výrobu byl použit univerzální plošný vrtaný spoj.



Obr. 25 Obvod pro obsluhu enkodérů

5.4 SBĚR, PŘIJÍMÁNÍ A ODESÍLÁNÍ DAT Z ENKODÉRŮ

Níže bude popsán princip jakým je dekodován signál předních enkodérů a způsob, kterým probíhá komunikace s dalšími zařízeními. Pro obě části – dekodování i komunikaci – byla z důvodu zpřehlednění kódu napsána knihovna. Obě knihovny používají knihovnu CMSIS-RTOS (Real Time Operating System).

5.4.1 SČÍTÁNÍ HRAN

Jak již bylo zmíněno výše, sčítání hran může při použití kvadrurního enkodéru probíhat ve třech různých rozlišeních. Sčítáme-li pouze jednu hranu prvního kanálu, inkrement za jednu otočku je roven počtu štěrbin v pásku. Můžeme také sčítat jak vzestupnou, tak i sestupnou hranu jednoho kanálu, což nám dá rozlišení dvojnásobné. Čtyřnásobného rozlišení pak dosáhneme sčítáním obou typů hran na obou kanálech. Pro potřeby této diplomové práce jsem se rozhodl použít právě tento režim.

⁵Původně jsem odpor dimenzoval na proud 50mA, avšak obvod příliš topil. Rozhodl jsem se proto snížit proud tekoucí diodou na třetinu. Snížení proudu nemělo žádný vliv na funkci světelné závor.

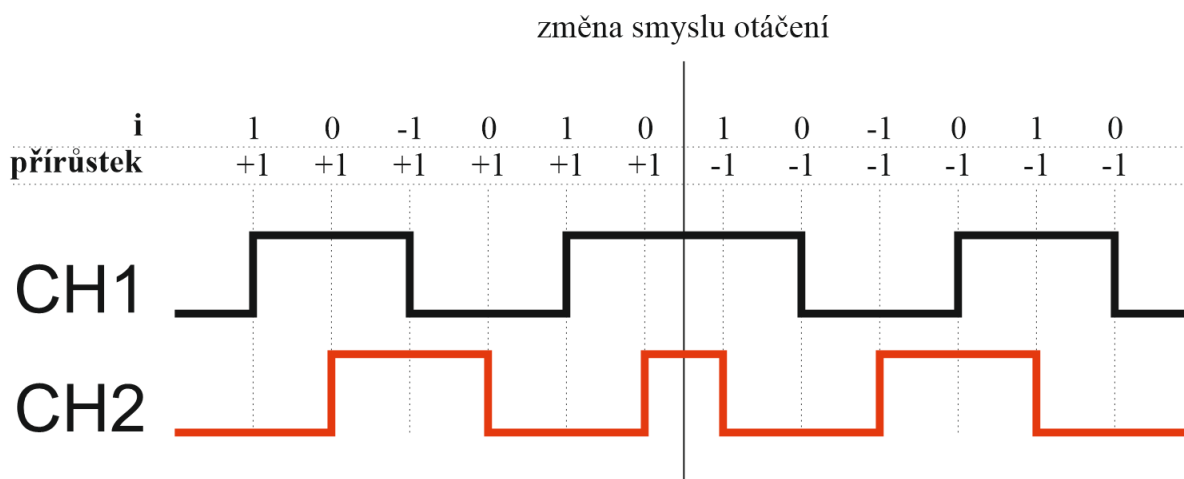
Použitím kvadrurního enkodéru jsme schopni rozlišit smysl otáčení kola. Označíme-li signál první světelné závory jako *CH1* a signál druhé jako *CH2*, kolo se otáčí v kladném směru, pokud *CH1* předbíhá *CH2* o čtvrt periody. [11]

V algoritmu sčítání hran jsem využil pomocnou veličinu, označenou *i*. Tato veličina nabývá hodnot $\{-1; 0; 1\}$ a mění se při detekování hrany⁶. Každá hrana má definováno, jak se změní hodnota veličiny *i* a přidělenou lineární rovnici⁷, pomocí které se vypočte přírůstek⁸.

Tab. 1 Změna veličiny *i* a výpočet přírůstku při detekci hrany

Kanál a hrana	CH1 - vzestupná	CH1 - sestupná	CH2 - vzestupná	CH2 - sestupná
Změna <i>i</i>	+1	-1	-1	+1
Rovnice přírůstku	$2 \cdot i - 1$	$-2 \cdot i - 1$	$2 \cdot i + 1$	$-2 \cdot i + 1$

Ilustrační případ sčítání hran lze vidět na **Obr. 26**.



Obr. 26 Příklad výpočtu přírůstku při změně smyslu otáčení kola

5.4.2 OCHRANA PROTI ZTRÁTĚ KROKU

Během provozu enkodérů může dojít k různým poruchám, nejčastěji ke ztrátě kroku – tedy takové poruše, kdy nedojde k zaznamenání jedné vzestupné a jedné sestupné hrany. To může nastat například při zanesení šterbiny nečistotou nebo při poškození pásku, kdy závora není schopna rozlišit dvě díry za sebou.

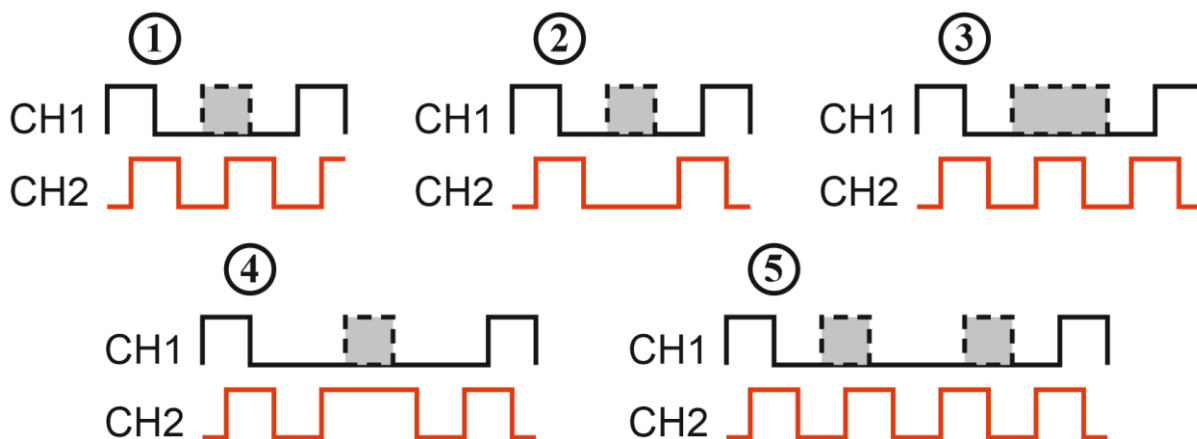
Pro případ, že nedojde ke ztrátě kroku na dvou za sebou ležících šterbinách, lze vytvořit algoritmus, který dokáže ztrátu kroku detekovat a následně opravit počet detekovaných hran.

⁶ Veličina *i* nabývá hodnoty 0 v případech, že jsou si logické stavy obou kanálů rovny.

⁷ Přírůstek se vypočte až po změně hodnoty veličiny *i*.

⁸ Pohybuje-li se kolo v kladném směru, přírůstek je +1, pohybuje-li se v záporném směru, přírůstek je -1.

Nyní uvažujme ztrátu jednoho kroku na *CH1*, při kterém měla být jako první detekována vzestupná hrana (např. zanesení šterbiny). Omezíme-li se na případ, kdy se kolo na počátku točilo v kladném směru a že došlo maximálně k jedné změně smyslu otáčení během poruchy, může nastat jedna z následujících 5 možností (**Obr. 27**). Šedě vybarvená část reprezentuje ztracený krok.



Obr. 27 Ztráta kroku v *CH1*

Na **Obr. 27** si lze všimnout, že pokud při ztrátě kroku nedojde ke změně smyslu otáčení (případ 1), během času, který uplynul mezi poslední zaznamenanou hranou kanálu *CH1* před poruchou a první hranou po poruše, byly detekovány 3 hrany kanálu *CH2*. Obdobně lze vidět, že nastane-li změna směru otáčení během poruchy, kanál *CH2* během výše zmíněného intervalu zaznamená vždy sudý počet hran (2 hrany u případu 2, 4 hrany u případu 3 a 4, resp. 6 hran u případu 5).

Uvážíme-li situaci, kdy během jedné poruchy dojde k sudému počtu změn směru, počet zaznamenaných hran v *CH2* během časového intervalu v *CH1* bude vždy lichý. Obdobně, pokud během poruchy dojde k lichému počtu změn směru, zaznamenané vždy sudý počet detekovaných hran v *CH2*.

Nastane-li během poruchy sudý počet změn směru, po zaznamenání první hrany kanálu *CH1* po poruše přičteme k celkovému počtu detekovaných hran +4 (otáčí-li se kolo v kladném směru), resp. -4 (v záporném směru). Pokud je počet změn směru otáčení lichý, není potřeba provádět žádnou korekci počtu hran, protože napočítané přírůstky během poruchy dají vždy 0 (poslední detekovaná hrana před poruchou je fyzicky stejná hrana, jako první zaznamenaná hrana po poruše).

Navíc, hodnotu pomocné veličiny *i* není nutné měnit, protože součet změn *i* na chybějících hranách bude vždy roven nule.

Výše uvedené poznatky pak lze analogicky rozšířit i na situace, ve kterých se kolo na počátku otáčí v záporném směru, situace, kde ztráta kroku nastala na kanále *CH2* a na situace, kde ztrátu kroku způsobilo splynutí dvou sousedních šterbin.

5.4.3 PŘIJÍMÁNÍ A ODESÍLÁNÍ DAT

Data, která z enkodérů sesbírá a zpracuje platforma Nucleo, je třeba distribuovat do vyšších řídicích struktur robota. Tato komunikace probíhá po sériovém portu. Jakmile je poslán požadavek na sdělení stavu enkodérů, Nucleo zprávu zpracuje a jako odpověď odešle aktuální počet detekovaných hran na levém i pravém kole.

Formát zprávy je podřízen univerzálnímu protokolu, platnému pro celého robota (**Obr. 28**). Všechny odchozí i příchozí byty jsou typu uint8, tedy kladné celé 8-bitové číslo.

start byte	délka zprávy	datový typ	ID zprávy	data[0]	...	data[délka-1]	kontrolní součet
------------	--------------	------------	-----------	---------	-----	---------------	------------------

Obr. 28 Protokol pro přijímání a odesílání zpráv

Start byte je proměnná, jejíž unikátní hodnota se používá jako indikátor začátku zprávy.

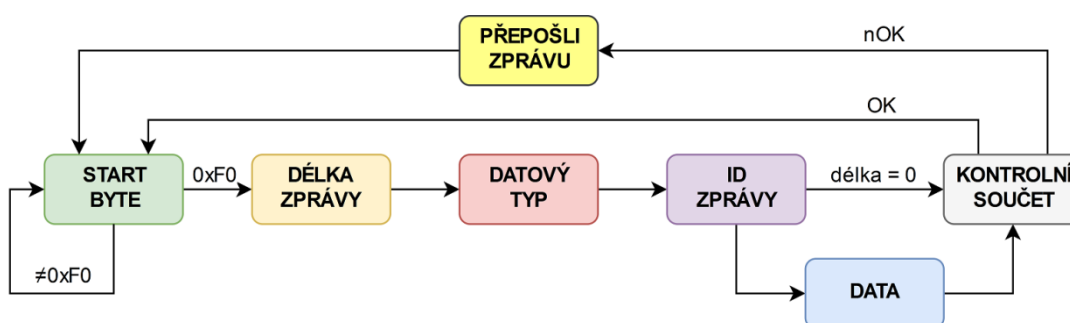
Délka zprávy definuje, kolik bytů obsahují data přenesená zprávou (v našem případě 8 bytů – 4 byty pro levé a 4 byty pro pravé kolo).

Datový typ udává, jakého typu jsou přenášená data. Pro tuto aplikaci se jedná o 2 celá 32-bitová čísla (2x int32).

ID zprávy slouží k identifikaci typu zprávy. Pro enkodéry má fixní hodnotu 57.

Data obsahují vlastní informaci, tedy počet hran, které byly na jednotlivých kolech od zapnutí enkodérů napočítány.

Kontrolní součet je byte, který slouží pro ověření správnosti zprávy. Jeho hodnota je součtem druhého až předposledního bytu zprávy.



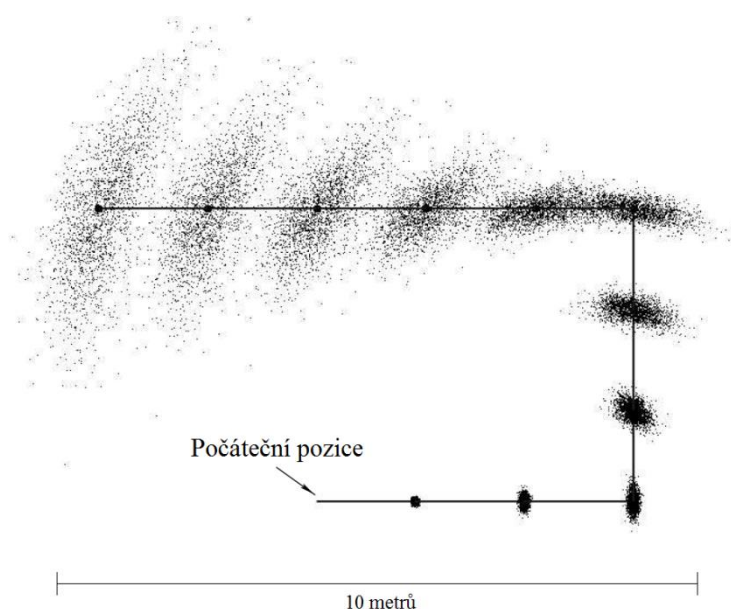
Obr. 29 Schéma přijímání zprávy

Přijímání zprávy je realizováno v nekonečné smyčce (**Obr. 29**), ve které se čeká na *zahajovací byte* předem definované hodnoty 0xF0 (v binárním tvaru 11110000). Jakmile tento byte dorazí, následuje přijímání *délky zprávy*, následně *datový typ* a *ID zprávy*. Na základě bytu *délka zprávy* se přijme daný počet datových bytů. Posledním příchozím bytem je *kontrolní součet*. Ten se porovnává s nově vytvořenou proměnnou, která vznikla součtem přijatých bytů. Pokud jsou si součty rovny, zpráva přišla v pořádku a čeká se na zahajovací byte nové zprávy. V případě, že si součty nejsou rovny, je před čekáním na zahajovací byte odeslán požadavek na přeposlání celé zprávy.

5.5 ODOMETRICKÝ MODEL

Jak již bylo výše zmíněno, odometrie je jedním z nejpoužívanějších způsobů určování polohy robota. Lokace robota je určována za pomoci známého kinematického modelu, informací o natočení řídicího serva a dat z enkodérů, které dávají informaci o ujeté vzdálenosti v pravidelných časových okamžicích. Derivací (nebo spíše diferencí) tohoto signálu můžeme získat informaci o rychlosti. Přesnost odometrie je omezena rozlišením enkodérů a precizností kinematického modelu. Pro přesnější estimaci polohy je vhodné kombinovat odometrii i s jinými metodami.

Bylo zjištěno, že odometrické modely vykazují vyšší přesnost než modely, využívající pro odhad polohy rychlost vozidla a jeho úhlovou rychlost. Z podstaty odometrie vyplývá její hlavní problém, kterým je skluz – jev, kdy se s časem sčítá chyba. S narůstající ujetou vzdáleností je stále obtížnější určit přesnou polohu robota. [23]



Obr. 30 Hromadění chyb v odometrických modelech [23]

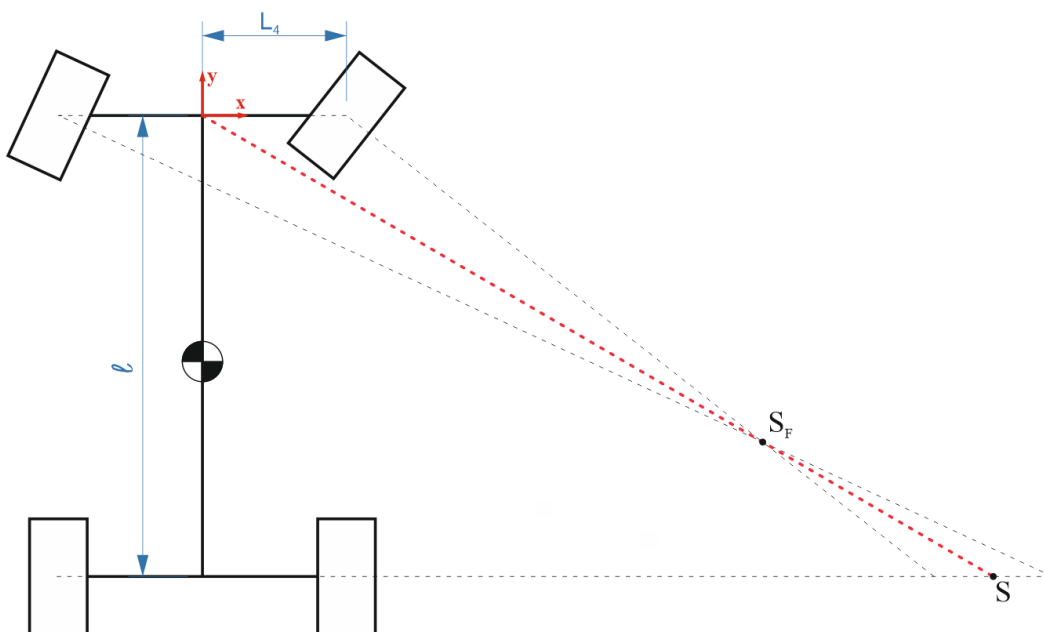
Za účelem dostatečně přesného odhadu polohy robota, je vhodné co nejpřesněji určit střed zatáčení vozu. Jak je vidět na **Obr. 31**, průsečík normál předních kol obecně neleží na normálách zadních kol, proto určení středu zatáčení není zcela jednoduchou úlohou. Abychom byli schopni tento bod přesně určit, museli bychom do modelu zahrnout vlastnosti pneumatik, které však nejsou známé a na různých površích se výrazně liší. Nezbyvá nic jiného, než polohu tohoto bodu odhadovat.



Obr. 31 *Vzdálenost průsečíku normál předních kol od osy zadních kol nově navržené geometrie řízení*

5.5.1 STŘED NA NORMÁLE ZADNÍCH KOL

Nejjednodušším modelem odhadu je spočítat průsečík osy zadních kol s přímkou vedenou z osy rotace serva do průsečíku normál předních kol (červená přímka na **Obr. 32**).



Obr. 32 *Odhad polohy středu zatáčení*

Tuto konstrukci popisují rovnice (19) až (24). Zde je y_{FR} rovnice normály pravého předního kola, y_{FL} rovnice normály levého předního kola, y_F rovnice přímky vedené z osy rotace serva do průsečíku normál předních kol⁹, S_F průsečík normál předních kol, S vypočtený střed zatáčení vozidla a l rozvor vozidla.

⁹ Přímku očekáváme ve tvaru $y = ax+b$, konstanta b je rovna nule, protože přímka prochází počátkem souřadného systému.

$$y_{FR} = (\tan \delta_R) \cdot x - L_4 \sin \delta_R \quad (19)$$

$$y_{FL} = (\tan \delta_L) \cdot x + L_4 \sin \delta_L \quad (20)$$

$$\mathbf{S}_F = \begin{bmatrix} S_{Fx} \\ S_{Fy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{L_4(\sin \delta_R + \sin \delta_L)}{\tan \delta_R - \tan \delta_L} \\ (\tan \delta_R) \cdot \left(\frac{L_4(\sin \delta_R + \sin \delta_L)}{\tan \delta_R - \tan \delta_L} \right) - L_4 \sin \delta_R \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$y_F = \left(\tan \frac{S_{Fy}}{S_{Fx}} \right) \cdot x \quad (22)$$

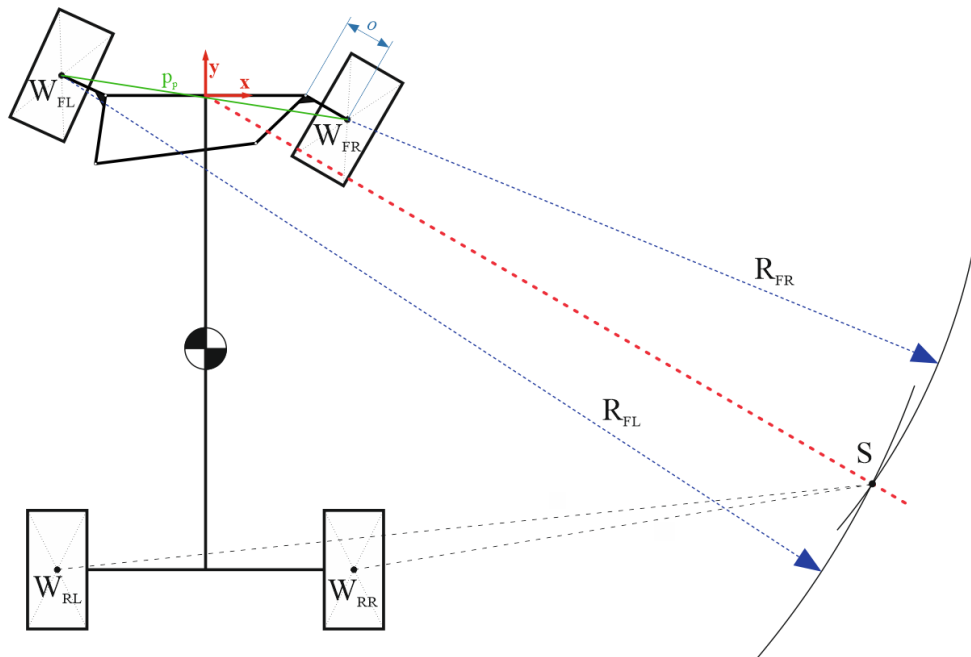
$$y_R = -l \quad (23)$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_x \\ S_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l \\ \tan \frac{S_{Fy}}{S_{Fx}} \end{bmatrix} \quad (24)$$

5.5.2 STŘED Z POMĚRU UJETÉ VZDÁLENOSTI KOL

Tato metoda je kombinuje výše zmíněný model Ackermannova řízení s reálnými daty o ujeté vzdálenosti předních kol. Na rozdíl od první metody nebudeme střed S očekávat na normále zadních kol, ale v poloze získané z poměru naměřené ujeté vzdálenosti kol. Stále však vycházíme z předpokladu, že střed bude ležet na přímce se sklonem z rovnice (22).

Model, výpočtu úhlu změny natočení je vidět na **Obr. 33**.



Obr. 33 Model získání středu zatáčení z poměru ujeté vzdálenosti předních kol

Prvním krokem k vypočtení polohy středu zatáčení robota je zjištění souřadnic kontaktních bodů pneumatik s vozovkou \mathbf{W}_{FL} a \mathbf{W}_{FR} a jejich vzdálenost, která je závislá na úhlu natočení α . Jelikož přesné určení těchto bodů není triviální úloha, zvolil jsem jejich umístění do geometrického středu kol. Souřadnice kontaktních bodů lze vypočítat pomocí rovnic (25) a (26), ve kterých o reprezentuje vzdálenost kola od osy rotace těhlice (např. pro pravé kolo vzdálenost $|AR|$). Vzdálenost bodů \mathbf{W}_{FL} a \mathbf{W}_{FR} je označena p_p (27).

$$\mathbf{W}_{FL} = \begin{bmatrix} W_{FLx} \\ W_{FLy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_4 - o \cdot \cos \delta_L \\ -o \cdot \sin \delta_L \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$\mathbf{W}_{FR} = \begin{bmatrix} W_{FRx} \\ W_{FRy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_4 + o \cdot \cos \delta_R \\ o \cdot \sin \delta_R \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$p_p = \sqrt{(W_{FRx} - W_{FLx})^2 + (W_{FRy} - W_{FLy})^2} \quad (27)$$

Nyní převedeme změnu počtu inkrementů Δc_n za jednu periodu na ujetou vzdálenost d_n pomocí konstanty e_n (28). Za index n se dosadí index daného kola.

$$d_n = \Delta c_n e_n \quad (28)$$

Poloha středu zatáčení robota se určí pomocí poměru k mezi ujetou vzdáleností pravého (d_{FR}) a levého (d_{FL}) kola (29). Z rovnice (30), vyjadřující změnu úhlu natočení vozidla ψ (viz kapitola *Změna polohy robota při známé poloze středu zatáčení*), je vidět, že poměr mezi napočítanými inkrementy příslušných kol je roven poměru jejich poloměrů.

$$k = \frac{d_{FR}}{d_{FL}} \quad (29)$$

$$\frac{d_{FL}}{R_{FL}} = \frac{d_{FR}}{R_{FR}} = \frac{d_{RL}}{R_{RL}} = \frac{d_{RR}}{R_{RR}} \quad (30)$$

Nyní vyjádříme fakt, že vzdálenost bodu S k pravému kolu je vůči vzdálenosti středu k levému kolu v poměru k . Můžeme tedy napsat rovnici (31), ve které na obou stranách první člen reprezentuje rozdíl x -ových souřadnic daných bodů a druhý člen rozdíl y -ových souřadnic bodů při podmínce, že hledaný bod S leží na přímce $y = ax + b$.

$$\sqrt{(W_{FRx} - S_x)^2 + (W_{FRy} - aS_x - b)^2} = k \sqrt{(W_{FLx} - S_x)^2 + (W_{FLy} - aS_x - b)^2} \quad (31)$$

Tato rovnice vede po úpravě na kvadratickou rovnici, ve které je neznámou souřadnice S_x (32). Lze si všimnout, že rovnice je ve tvaru $A_q S_x^2 + B_q S_x + C_q = 0$. Koeficienty A_q , B_q a C_q mají následující hodnoty (33)-(35).

$$\begin{aligned} S_x^2 [1 + a^2 - k^2 - k^2 a^2] \\ + S_x [-2W_{FRx} - 2a(W_{FRy} - b) + 2W_{FLx} k^2 + 2ak^2(W_{FLy} - b)] \\ + [W_{FRx}^2 + (W_{FRy} - b)^2 - k^2 W_{FLx}^2 - k^2 (W_{FLy} - b)^2] = 0 \end{aligned} \quad (32)$$

$$A_q = 1 + a^2 - k^2 - k^2 a^2 \quad (33)$$

$$B_q = -2W_{FRx} - 2a(W_{FRy} - b) + 2W_{FLx}k^2 + 2ak^2(W_{FLy} - b) \quad (34)$$

$$C_q = W_{FRx}^2 + (W_{FRy} - b)^2 - k^2 W_{FLx}^2 - k^2 (W_{FLy} - b)^2 \quad (35)$$

Rovnice má kořeny dva kořeny (36), z nichž vybereme ten, který je v absolutní hodnotě větší.

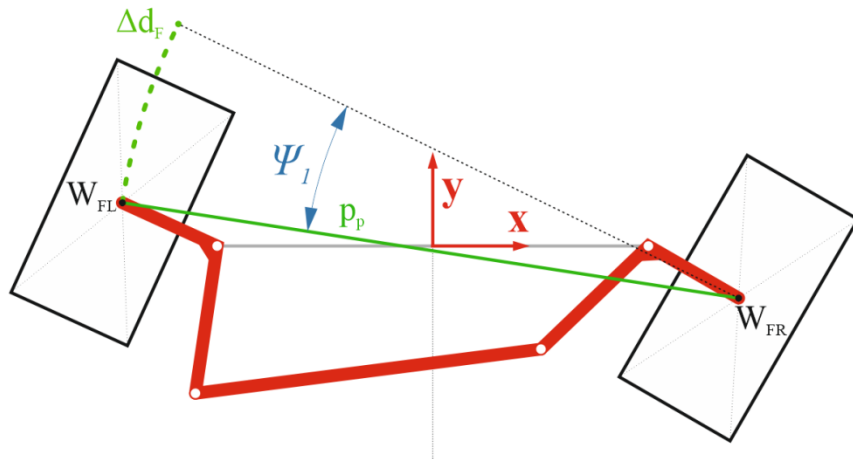
$$S_{x1,2} = \frac{-B_q \pm \sqrt{B_q^2 - 4A_q C_q}}{2A_q} \quad (36)$$

Souřadnici y bodu S vypočteme dosazením souřadnice S_x za x v rovnici přímky, na které bod S očekáváme (37). Sklon přímky a se shoduje se sklonem z rovnice (22).

$$S_y = aS_x + b \quad (37)$$

5.5.3 STŘED Z ROZDÍLU UJETÉ VZDÁLENOSTI KOL

Další možností, jak vypočíst okamžitý střed zatáčení je přímým využitím dat z enkodérů. Za pomoci rozdílu ujeté vzdálenosti předních kol za daný časový okamžik se vypočte úhel změny natočení robota. Z tohoto úhlu a znalosti ujeté vzdálenosti se vypočtou poloměry zatáčení jednotlivých kol, ze kterých se aproximuje střed zatáčení. Podmínkou, aby tento algoritmus správně fungoval, je vhodná volba frekvence, kterou budou získávána data z enkodérů. Ta musí být dostatečně malá, aby chyby vzniklé diskretním snímáním otočení kol příliš neovlivňovaly úhel změny natočení vozu, ale naopak musí být dostatečně velká, aby během jedné periody bylo možné jízdu aproximovat jízdu za stálého poloměru.



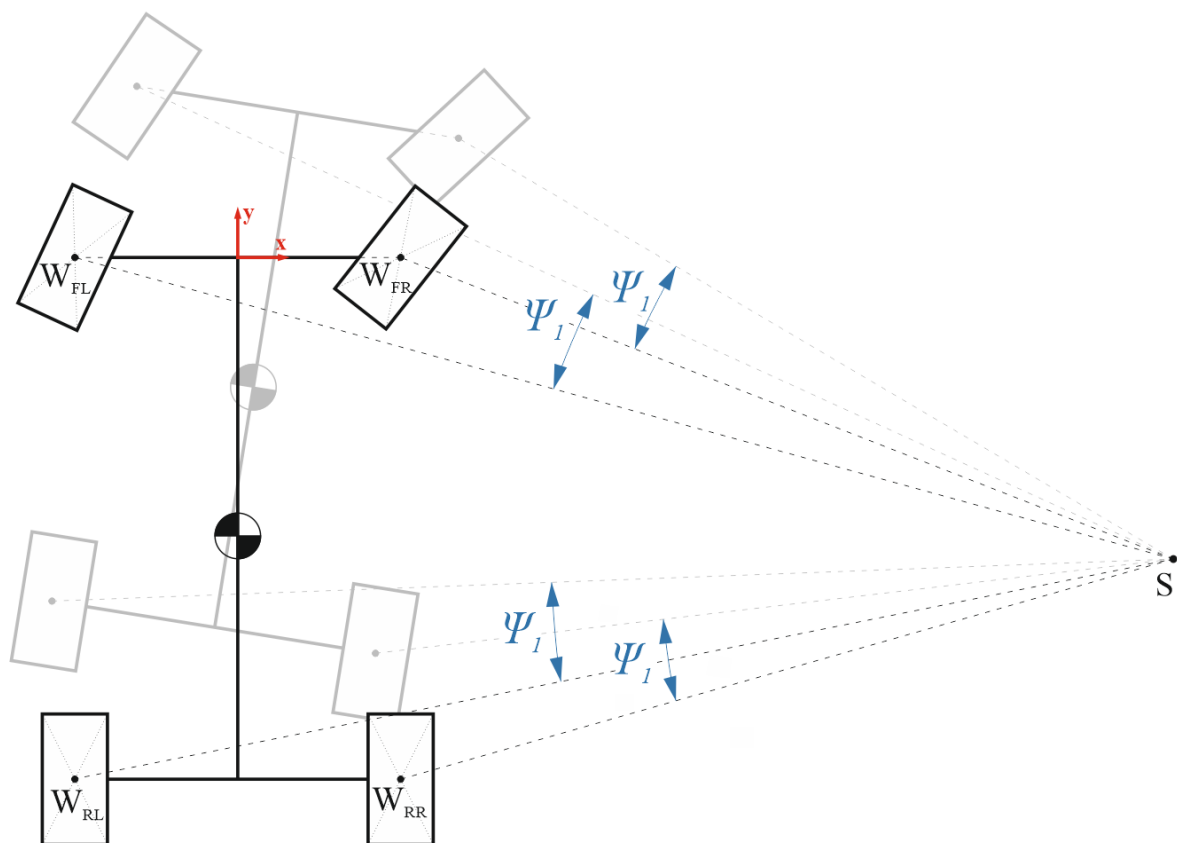
Obr. 34 Výpočet změny úhlu natočení vozidla

Pro určení směrnice přímky, na které má ležet střed zatáčení, ještě potřebujeme znát rozdíl ujeté vzdálenosti Δd_F (38). Nyní už lze vypočítat úhel ψ_I jako (39).

$$\Delta d_F = |d_{FL} - d_{FR}| \quad (38)$$

$$\psi_1 = \frac{\Delta d_F}{p_p} \quad (39)$$

Definice úhlu ψ_1 vychází z podmínky konstantní vzdálenosti mezi předními koly. Tak vznikne kružnice se středem v bodě W_{FR} a poloměrem p_p . Na obvod této kružnice je od bodu W_{FL} nanesen rozdíl ujeté vzdálenosti levého a pravého předního kola. Úhel ψ_1 pak symbolizuje relativní změnu směru levého předního kola vůči pravému přednímu. Jak je vidět na **Obr. 35**, o stejný úhel se při zatáčení natočí celý robot.



Obr. 35 Výpočet středu zatáčení využitím rozdílu ujetých vzdáleností předních kol

V tento okamžik lze určit poloměry zatáčení všech kol R_n jako (40).

$$R_n = \frac{d_n}{\psi_1} \quad (40)$$

Střed zatáčení se získá jako průsečík páru kružnic se středy ve styčném bodě dvou libovolných kol a příslušnými poloměry.

$$(S_x - W_{1x})^2 + (S_y - W_{1y})^2 = R_1^2 \quad (41)$$

$$(S_x - W_{2x})^2 + (S_y - W_{2y})^2 = R_2^2 \quad (42)$$

Odečtením rovnic (41) a (42) a následným vyjádřením proměnné S_y v závislosti na S_x dostáváme rovnici (43). Po dosazení výrazu do rovnice (41) a následnou úpravou na tvar $A_q S_x^2 + B_q S_x + C_q = 0$ dostáváme (44)-(46).

$$S_y = S_x \frac{W_{1x} - W_{2x}}{W_{2y} - W_{1y}} + \frac{R_1^2 - R_2^2 + W_{2y}^2 - W_{1y}^2 + W_{2x}^2 - W_{1x}^2}{2(W_{2y} - W_{1y})} \quad (43)$$

$$A_q = 1 + \left(\frac{W_{1x} - W_{2x}}{W_{2y} - W_{1y}} \right)^2 \quad (44)$$

$$B_q = -2W_{1x} + \frac{W_{1x} - W_{2x}}{W_{2y} - W_{1y}} \cdot \frac{R_1^2 - R_2^2 + W_{2y}^2 - W_{1y}^2 + W_{2x}^2 - W_{1x}^2}{W_{2y} - W_{1y}} - 2W_{1y} \frac{W_{1x} - W_{2x}}{W_{2y} - W_{1y}} \quad (45)$$

$$C_q = W_{1x}^2 + W_{1y}^2 - R_1^2 + \left[\frac{R_1^2 - R_2^2 + W_{2y}^2 - W_{1y}^2 + W_{2x}^2 - W_{1x}^2}{2(W_{2y} - W_{1y})} \right]^2 - W_{1y} \left[\frac{R_1^2 - R_2^2 + W_{2y}^2 - W_{1y}^2 + W_{2x}^2 - W_{1x}^2}{W_{2y} - W_{1y}} \right] \quad (46)$$

Souřadnice S_{x1} , resp. S_{x2} nakonec vypočteme pomocí diskriminantu (36) a následným dosazením do rovnice (43) získáme příslušné souřadnice S_{y1} , resp. S_{y2} . Vzhledem ke geometrii z **Obr. 35** vybereme souřadnice S tak, aby při natočení kol doprava byla x -ová souřadnice kladná a naopak při natočení kol doleva byla x -ová souřadnice záporná.

Rovnice (43)-(46) platí pouze pro případ, že y -ová souřadnice kol je rozdílná. V případě, že se souřadnice rovnají, provede se výpočet koeficientů pomocí rovnic (47)-(50), které vznikly odečtením rovnice (42) od (41) za předpokladu $W_{1y} = W_{2y}$.

$$S_x = \frac{W_{1x}^2 - W_{2x}^2 - R_1^2 + R_2^2}{2(W_{1x} - W_{2x})} \quad (47)$$

$$A_q = 1 \quad (48)$$

$$B_q = -2W_{1y} \quad (49)$$

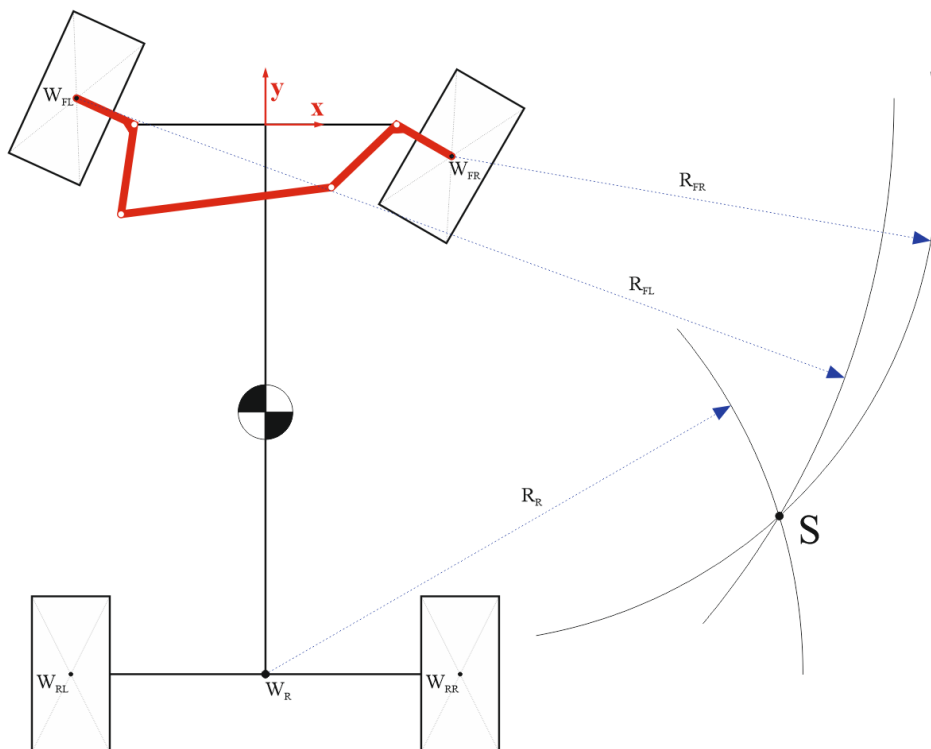
$$C_q = (S_x - W_{1x})^2 + W_{1y}^2 - R_1^2 \quad (50)$$

Na tyto rovnice opět aplikujeme diskriminant (36) s tím rozdílem, že pomocí něj vypočteme y -ové souřadnice bodu S . Dosazením do (47) získáme S_x .

Abychom dosáhli přesnějších výsledků, provede se výpočet průsečíku pro více párů kol a výsledné souřadnice bodu S se získají z aritmetického průměru takto vypočtených bodů.

5.5.4 STŘED ZATÁČENÍ JAKO PRŮSEČÍK TŘÍ KRUŽNIC

Myšlenkou této metody je vypočítat střed zatáčení jako průsečík tří kružnic, u kterých známe polohu středu a poměry jejich poloměrů (**Obr. 36**). Informace o natočení řídicího serva bude využita pouze pro určení styčných bodů předních kol.



Obr. 36 Výpočet středu zatáčení s využitím dat z předních i zadních enkodérů

Z ujetých vzdáleností jednotlivých kol (28) dále vytvoříme poměry k_F a k_R mezi ujetou vzdáleností pravého předního kola vůči levému přednímu, resp. aritmetického průměru ujetých vzdáleností zadních kol¹⁰ vůči ujeté vzdálenosti levého předního kola (51), (52).

$$k_F = \frac{d_{FR}}{d_{FL}} \quad (51)$$

$$k_R = \frac{d_{RL} + d_{RR}}{2d_{FL}} \quad (52)$$

Střed kružnice reprezentující zadní kola umístíme do geometrického středu mezi zadní kola, tedy do bodu \mathbf{W}_R (53).

$$\mathbf{W}_R = \begin{bmatrix} W_{Rx} \\ W_{Ry} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -l \end{bmatrix} \quad (53)$$

¹⁰ Nutné zjednodušení, aby úloha nebyla přeurčená.

Jak již bylo naznačeno v rovnici (30), poměry ujeté vzdálenosti odpovídají poměrům poloměrů příslušných kol (54), (55).

$$R_{FR} = k_F R_{FL} \quad (54)$$

$$R_R = k_R R_{FL} \quad (55)$$

K výpočtu průsečíku tří kružnic byla použita iterativní metoda. V prvním kroku byl vyjádřen obecný průsečík dvou kružnic se středem ve styčných bodech předních kol podle rovnic (41)-(50), kde za index 1 bylo dosazeno levé přední kolo (FL) a za index 2 pravé přední kolo (FR). Na rozdíl od předchozího případu však ze dvou řešení vybereme to, jehož y -ová souřadnice je menší.

Nyní můžeme vyjádřit poloměr reprezentující zadní kola pomocí souřadnic středu zatáčení jako (56).

$$R_R = \sqrt{(S_x - W_{Rx})^2 + (S_y - W_{Ry})^2} = \sqrt{S_x^2 + (S_y - W_{Ry})^2} \quad (56)$$

V rovnicích pro výpočet průsečíku dvou kružnic vystupuje neznámá R_I (změněna na R_{FL}). Jelikož by ale bylo komplikované zakomponovat rovnici (56) do těchto rovnic, byl problém řešen iterativně pomocí Newtonovy metody.

Nejdříve označme poloměr R_R z rovnice (55) jako R_{R1} , a z rovnice (56) jako R_{R2} . Tyto poloměry jsou v první iteraci vypočteny z počátečního odhadu poloměru zatáčení levého předního kola R_{FL} . Dále byl spočten rozdíl poloměrů R_{R1} a R_{R2} . V druhé iteraci byl změněn vstup R_{FL} o 1% a byl proveden nový výpočet. Ze změny rozdílu poloměrů v závislosti na změně poloměru R_{FL} byla vytvořena difference dif . Index n v rovnicích (57) a (58) znamená n -tou (aktuální) iteraci. Koeficient q má význam zesílení difference¹¹.

$$dif = \frac{(R_{R2}^n - R_{R1}^n) - (R_{R2}^{n-1} - R_{R1}^{n-1})}{R_{FL}^n - R_{FL}^{n-1}} \quad (57)$$

$$R_{FL}^{n+1} = R_{FL}^n - q \frac{(R_{R2}^n - R_{R1}^n)}{dif} \quad (58)$$

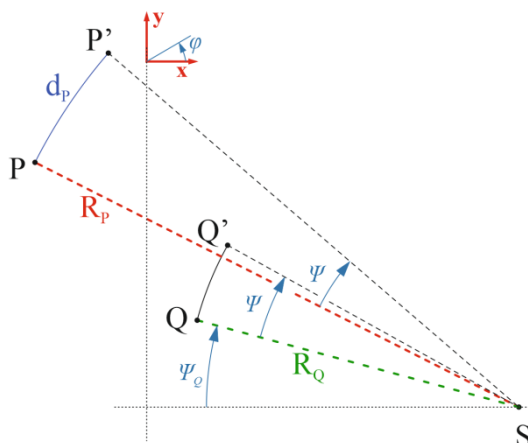
Výpočet probíhá do té doby, než je rozdíl poloměrů R_{R1} a R_{R2} menší, než předepsaná hodnota.

Podmínkou správného fungování algoritmu je dostatečně přesný počáteční odhad poloměru R_{FL} v první iteraci. Optimálním řešením počátečního odhadu je použitím některé z předchozích metod k orientačnímu výpočtu středu zatáčení, ze kterého se poloměr zatáčení levého předního kola vypočte jako odmocnina rovnice (41).

¹¹ Koeficient q byl z důvodu konvergence nastaven na hodnotu $q < 1$.

5.5.5 ZMĚNA POLOHY ROBOTA PŘI ZNÁMÉ POLOZE STŘEDU ZATÁČENÍ

Změnu polohy robota v lokálním souřadném systému lze spočítat pomocí **Obr. 37**. Známeli ujetou vzdálenost v obecném bodě \mathbf{P} (označena d_P) a polohu středu zatáčení \mathbf{S} , jsme schopni vypočítat úhel ψ , který udává otočení bodu \mathbf{P} kolem \mathbf{S} . O tento úhel se otočí i libovolně zvolený bod (obecně označený jako \mathbf{Q}).



Obr. 37 Výpočet změny polohy robota

Inkrement lokálních souřadnic Δx , Δy a úhlu $\Delta\varphi$ se vypočítají rozdílem mezi původními souřadnicemi (nebo natočením) bodu \mathbf{Q} a přepočtenými (bod \mathbf{Q}')¹². V rovnicích (59)–(64) figurují R_P jako vzdálenost bodů S a P , R_Q jako vzdálenost bodů S a \mathbf{Q} a ψ_Q jako úhel osy x s úsečkou R_Q .

Jelikož byly rovnice (62)-(64) odvozeny pouze pro pravotočivou zatáčku a jízdu vpřed, byly do rovnic přidány funkce signum, které tyto rovnice rozšíří i na případy levotočivé zatáčky a jízdy vzad.

$$R_P = \sqrt{(P_x - S_x)^2 + (P_y - S_y)^2} \quad (59)$$

$$\psi = \frac{d_p}{R_p} \quad (60)$$

$$\psi_Q = \sin^{-1} \frac{Q_y - S_y}{R_Q} \quad (61)$$

$$\Delta x = -R_\theta (\cos(\psi_\theta + \psi) - \cos \psi_\theta) \cdot \text{sign}(S_x) \quad (62)$$

$$\Delta y = R_o(\sin(\psi_o + \psi) - \sin \psi_o) \quad (63)$$

$$\Delta\varphi = \psi \cdot \text{sign}(-S_x) \quad (64)$$

¹² Počátek souřadného systému pro výpočet inkrementů v rovnicích (62)-(64) byl pro zjednodušení posunut do bodu S .

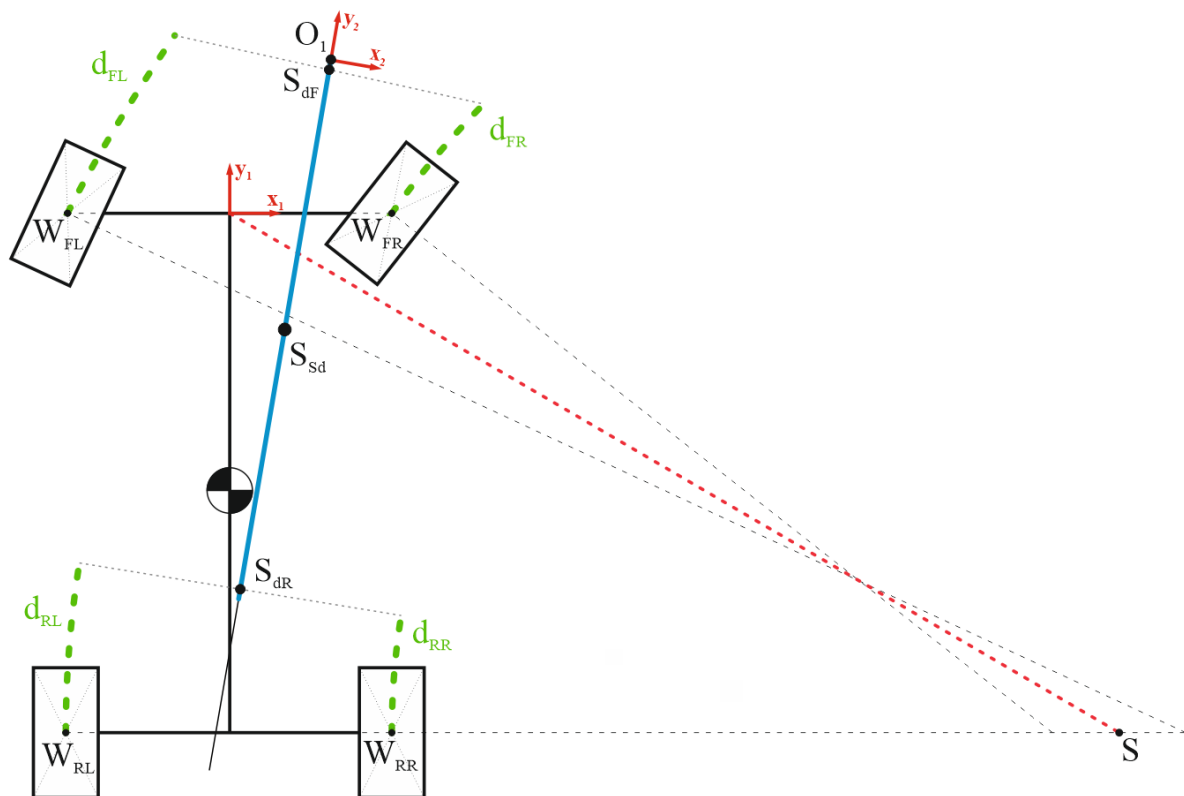
Nyní už zbývá jen přepočítat změny lokálních souřadnic na absolutní souřadnice. Výpočet souřadnic x_{abs} a y_{abs} byl proveden pomocí transformační matice (65) a úhel natočení vozu φ_{abs} byl získán přičtením rozdílové souřadnice k původní (66). Horní index $n-1$ značí souřadnice z předchozího kroku. [24]

$$\begin{bmatrix} x_{abs} \\ y_{abs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_{abs}^{n-1} & -\sin \varphi_{abs}^{n-1} \\ \sin \varphi_{abs}^{n-1} & \cos \varphi_{abs}^{n-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{abs}^{n-1} \\ y_{abs}^{n-1} \end{bmatrix} \quad (65)$$

$$\varphi_{abs} = \varphi_{abs}^{n-1} + \Delta\varphi \quad (66)$$

5.5.6 ZMĚNA POLOHY ROBOTA Z POSUVŮ KOL

Tato metoda sice nehledá střed zatáčení robota, avšak z informace o ujeté vzdálenosti všech kol přímo odhaduje novou polohu robota. Ta se vypočte nejdříve v lokálním souřadnicovém systému a poté se transformuje do globálního.



Obr. 38 Model určení změny polohy pomocí známých posuvů všech kol

V prvním kroku se vypočte odhad středu zatáčení z Ackermannovy geometrie (19)-(24). Dále se vypočte změna souřadnic všech kol v lokálním souřadném systému podle (59)-(63) a vytvoří se úsečky spojující vypočtené koncové body předních, resp. zadních kol.

Nyní se určí středy takto vytvořených úseček S_{dF} , resp. S_{dR} (67), (68) a proloží se přímkou (69).

$$\mathbf{S}_{dF} = \begin{bmatrix} S_{dFx} \\ S_{dFy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{W_{FLx} + W_{FRx} + \Delta x_{FL} + \Delta x_{FR}}{2} \\ \frac{W_{FLy} + W_{FRy} + \Delta y_{FL} + \Delta y_{FR}}{2} \end{bmatrix} \quad (67)$$

$$\mathbf{S}_{dR} = \begin{bmatrix} S_{dRx} \\ S_{dRy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{W_{RLx} + W_{RRx} + \Delta x_{RL} + \Delta x_{RR}}{2} \\ \frac{W_{RLy} + W_{RRy} + \Delta y_{RL} + \Delta y_{RR}}{2} \end{bmatrix} \quad (68)$$

$$y_d = a_d x + b_d = \left(\tan \frac{S_{dFy} - S_{dRy}}{S_{dFx} - S_{dRx}} \right) x + \left[S_{dFy} - \left(\tan \frac{S_{dFy} - S_{dRy}}{S_{dFx} - S_{dRx}} \right) S_{dFx} \right] \quad (69)$$

Jelikož vzdálenost bodů \mathbf{S}_{dF} a \mathbf{S}_{dR} není přesně rovna rozvoru, najdeme střed \mathbf{S}_{sd} úsečky vedené těmito body a na přímkou y_d vyneseme na obě strany polovinu rozvoru – tím máme definovanou novou polohu vozidla.

$$\mathbf{S}_{sd} = \begin{bmatrix} S_{sdx} \\ S_{sdy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{S_{dFx} + S_{dRx}}{2} \\ \frac{S_{dFy} + S_{dRy}}{2} \end{bmatrix} \quad (70)$$

$$(x - S_{sdx})^2 + (y - S_{sdy})^2 = \left(\frac{l}{2} \right)^2 \quad (71)$$

$$y = a_d x + b_d \quad (72)$$

$$A_q = 1 + a_d^2 \quad (73)$$

$$B_q = -2S_{sdx} + 2a_d b_d - 2S_{sdy} a_d \quad (74)$$

$$C_q = S_{sdx}^2 + b_d^2 - 2S_{sdy} b_d + S_{sdx}^2 - \left(\frac{l}{2} \right)^2 \quad (75)$$

Dosazením koeficientů A_q , B_q a C_q do (36) a poté dosazením hodnot do (72) získáme dva body, z nichž vybereme ten, který má větší složku y . Tento bod označíme \mathbf{O}_I .

Bod \mathbf{O}_I je počátkem nového souřadnicového systému, který je vůči původnímu lokálnímu systému posunut a pootočen. Naším úkolem je teď zjistit, jak se po popojetí robota změní souřadnice referenčního bodu, ve kterém chceme měřit absolutní polohu.

K tomu potřebujeme nejdřív určit úhel natočení mezi oběma lokálními souřadnými systémy.

$$\Delta\varphi = \tan^{-1} a_d \quad (76)$$

Změnu polohy bodu \mathbf{Q} v souřadnicovém systému 1 spočteme transformací (77). Index 2 značí polohu vztaženou k souřadnicovému systému 2. [24]

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_{1x} \\ \Delta Q_{1y} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Delta\varphi & -\sin \Delta\varphi & 0 & O_{1x} \\ \sin \Delta\varphi & \cos \Delta\varphi & 0 & O_{1y} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Q_{2x} \\ Q_{2y} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Q_{2x} \\ Q_{2y} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (77)$$

Polohu bodu **Q** v absolutním souřadnicovém systému vypočteme dosazením hodnot $\Delta\varphi$, ΔQ_{1x} a ΔQ_{1y} do rovnic (65) a (66).

6 MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ DAT

Tato kapitola se bude zabývat ověřením správné funkčnosti předních enkodérů a použitím naměřených dat pro odometrické účely. Budou popsány podmínky, za kterých byla data naměřena, dále bude popsán způsob kalibrace senzorů, bude identifikována závislost úhlu natočení řídicího serva na řídicím signálu a nakonec budou vyhodnoceny odometrické modely aplikované na reálná data. Na základě těchto výsledků pak bude rozhodnuto o vhodnosti použití typu kol pro dané podmínky.

Všechny naměřené souřadnice ve všech měřeních byly zaznamenány ihned za zadním nárazníkem robota, tedy v lokální souřadnici $[0, -505]$. Tomuto bodu odpovídají i simulované trajektorie. Ve všech měřeních byl robot ovládán pomocí gamepadu.

Data z enkodérů byla, podobně jako řídicí signál serva zaznamenávána s vzorkovací frekvencí 10 Hz.

První měření dat bylo realizováno na rovné asfaltové ploše s původní sadou kol. Základní motivací tohoto měření bylo ověřit, zda zpracování dat enkodérů z embedded zařízení funguje spolehlivě a zda takto získaná data jsou „uvěřitelná“, což, jak bude vidět dále, se potvrdilo. Byla naměřena data pro kalibraci enkodérů a určení charakteristiky řídicího serva a dále byly uskutečněny krátké jízdy, během kterých byla zaznamenávána trajektorie robota. Pomocí těchto dat byly odladěny odometrické modely.

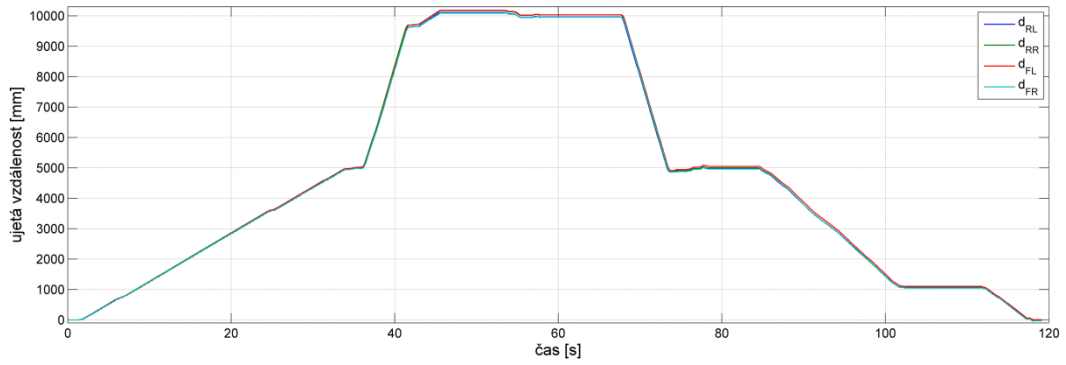
Účelem druhého měření bylo nasbírat potřebná data pro rozhodnutí o vhodnosti dostupných typů kol pro různé povrchy. Jízdy byly prováděny v budově na dlažbě a venku na travnaté ploše. Během vyhodnocování naměřených dat bylo potvrzeno, že vůz osazený různými druhy kol interaguje s různými povrchy rozdílně. Vliv povrchu a typu kol byl proto kompenzován úpravou charakteristiky řízení v odometrickém modelu.

Jelikož některá data získaná z druhého měření byla zašuměná (došlo k uvolnění jednoho z kol), chybějící data byla doměřena následující den. Navíc byly měřeny jízdy po jiných bodech, aby bylo možné odhadovat charakteristiku na základě alespoň dvou různých měření.

6.1 KALIBRACE ENKODÉRŮ

Prvními daty, která byla potřeba naměřit, byla data pro zjištění konstanty e , sloužící k převodu napočítaných inkrementů enkodérů na ujetou vzdálenost dle rovnice (28). K zjištění této konstanty pro původní kola byla provedena následující jízdní sekvence:

- jízda 5 m pomalu vpřed,
- zastavení,
- rychlá jízda 5 m vpřed (hranice 10m byla přejetá asi o 0,2 m, proto následovalo krátké couvání),
- rychlá jízda 5 m vzad,
- zastavení,
- pomalá jízda cca 4 m vzad,
- zastavení,
- pomalá jízda vzad na souřadnici 0 m.



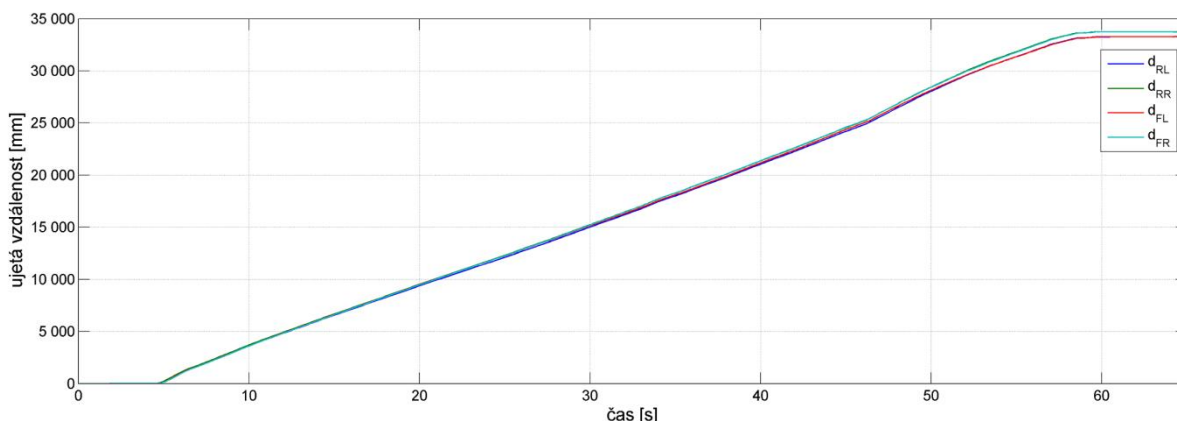
Obr. 39 Výsledek kalibrace enkodérů na původní kola

Pro jednotlivá kola byl zjištěn rozdíl naměřených dílků pro jízdu 10m vpřed a poté 10m vzad. Tyto hodnoty byly dosazeny do rovnice (28). Pro každé kolo tedy jsou naměřeny 2 hodnoty délky inkrementu. Jelikož oba přední enkodéry mají shodné vlastnosti, konstanta e má pro tato kola stejnou hodnotu. Obdobně i zadní kola mají stejnou hodnotu e . To znamená, že velikost inkrementu pro oba páry kol vypočteme jako aritmetický průměr ze 4 absolutních hodnot e . Nakonec vynásobíme příslušnou délku inkrementu znaménkem zohledňujícím orientaci inkrementů jednotlivých enkodérů (78).

$$\mathbf{e}_1 = \begin{bmatrix} e_{1FL} \\ e_{1FR} \\ e_{1RL} \\ e_{1RR} \end{bmatrix} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} \sum |e_{1Fi}| \\ \sum |e_{1Fi}| \\ \sum |e_{1Ri}| \\ \sum |e_{1Ri}| \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2,2537 \\ -2,2537 \\ 0,035 \\ -0,035 \end{bmatrix} \quad (78)$$

Kalibrace enkodérů pro kola Arsenal byla provedena na 33,5 m dlouhé rovině pouze v jednom směru, pro každý pár kol byly tedy k dispozici pouze 2 hodnoty. Vyhodnocení proběhlo stejným způsobem, jako v předchozím případě, výsledky jsou uvedeny v (79).

$$\mathbf{e}_2 = \begin{bmatrix} e_{2FL} \\ e_{2FR} \\ e_{2RL} \\ e_{2RR} \end{bmatrix} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} \sum |e_{2Fi}| \\ \sum |e_{2Fi}| \\ \sum |e_{2Ri}| \\ \sum |e_{2Ri}| \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2,0733 \\ -2,0733 \\ 0,032 \\ -0,032 \end{bmatrix} \quad (79)$$



Obr. 40 Výsledek kalibrace enkodérů na kola Arsenal

Na **Obr. 40** lze pozorovat, že ujetá vzdálenost pravých a levých kol je mírně rozdílná, nejedná se však o žádnou chybu, rozdíl je způsoben drobnou korekcí řízení během jízdy.

Jelikož vypočtené délky inkrementu původních kol odpovídaly ujeté vzdálenosti i na 33,5 m dlouhé trati, jejich délka již nebyla přepočítávána.

6.2 FILTRACE DAT

Podmínkou správného fungování všech odometrických modelů jsou kvalitní data. Největším problémem u našich naměřených dat byl šum způsobený nízkou přesností enkodérů. Jak je vidět výše, zadní enkodéry mají mnohonásobně vyšší rozlišení, než přední, což se výrazně odrazilo na kvalitě signálu. Aby se data zlepšila, byly použity následující filtry.

Porovnání naměřených a vyfiltrovaných dat je vidět na **Obr. 41** na konci kapitoly.

6.2.1 PŘEVZORKOVÁNÍ

Může nastat situace, kdy odometrické modely nefungují správně kvůli příliš vysoké vzorkovací frekvenci, díky které jsou vypočtené poměry ujeté vzdálenosti kol příliš hrubé. V tomto případě je vhodné uměle snížit vzorkovací frekvenci.

6.2.2 OMEZENÍ MAXIMÁLNÍ RYCHLOSTI

Robot Bender 2 se může pohybovat jen omezenou rychlostí. Maximální naměřená rychlost během testování na rovné trati byla $1,06 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, což odpovídá ujeté vzdálenosti 106 mm za 1 periodu. Můžeme tedy očekávat, že naměřené rychlosti, které budou výrazně překračovat tuto mez, jsou chybné, a tedy je lze odfiltrovat. Tato hranice byla nastavena na $1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

6.2.3 DETEKCE STOJÍCÍHO ROBOTA

Další událostí, kdy mohou vznikat chyby v odometrických modelech je situace, kdy se robot nepohybuje. Může se například stát, že kolo zastaví na rozhraní detekce hrany a sebemenší zakmitnutí robota může být detekováno. Tomuto problému navíc přispívá fakt, že kvůli ochraně proti ztrátě kroku implementované v předních enkodérech je vícekrát zaznamenána událost stejné hrany a jsou přičteny nebo odečteny 4 inkrementy.

Proto byl filtr vytvořen tak, aby, když alespoň jeden z enkodérů zaznamená nulovou rychlost, jsou rychlosti všech enkodérů vynulovány.

6.2.4 OCHRANA PROTI OPAČNÉMU SMYSLU OTÁČENÍ KOL

Tento filtr zabráňuje situacím, kdy je zaznamenán opačný směr otáčení jednoho kola oproti ostatním. V tomto případě je vzdálenost dopočtena ze zbylých tří kol.

Nastane-li tato situace, korigovaná hodnota (80) se vypočte z poměru ujetých vzdáleností druhého páru, který se vynásobí ujetou vzdáleností druhého kola prvního páru. V rovnicích mají indexy n a m význam páru kol (rozlišujeme přední a zadní), indexy 1 a 2 pak stranu, na které se kolo nachází (levá a pravá).

$$d_{n1} = \frac{d_{m1}}{d_{m2}} \cdot d_{n2} \quad (80)$$

6.2.5 OMEZENÍ MAXIMÁLNÍHO ZRYCHLENÍ

Omezení zrychlení bylo implementováno z důvodu ochrany proti šumění senzoru, které nastává v případě uvolnění kola. V tomto případě signál obsahuje výrazné špičky oscilující okolo očekávané hodnoty ujeté vzdálenosti. Tyto špičky však není vhodné filtrovat průměrováním s hodnotami z předchozích časových kroků, protože filtrace může reálnou hodnotu výrazně snížit. To má za následek, že odometrické modely přestávají fungovat. Korigovaná hodnota přírůstku se vypočte dle vzorce (81), ve kterém index $i-1$ značí hodnotu z předchozího krok.

$$d_{n1} = d_{n1}^{i-1} + d_{n2} - d_{n2}^{i-1} \quad (81)$$

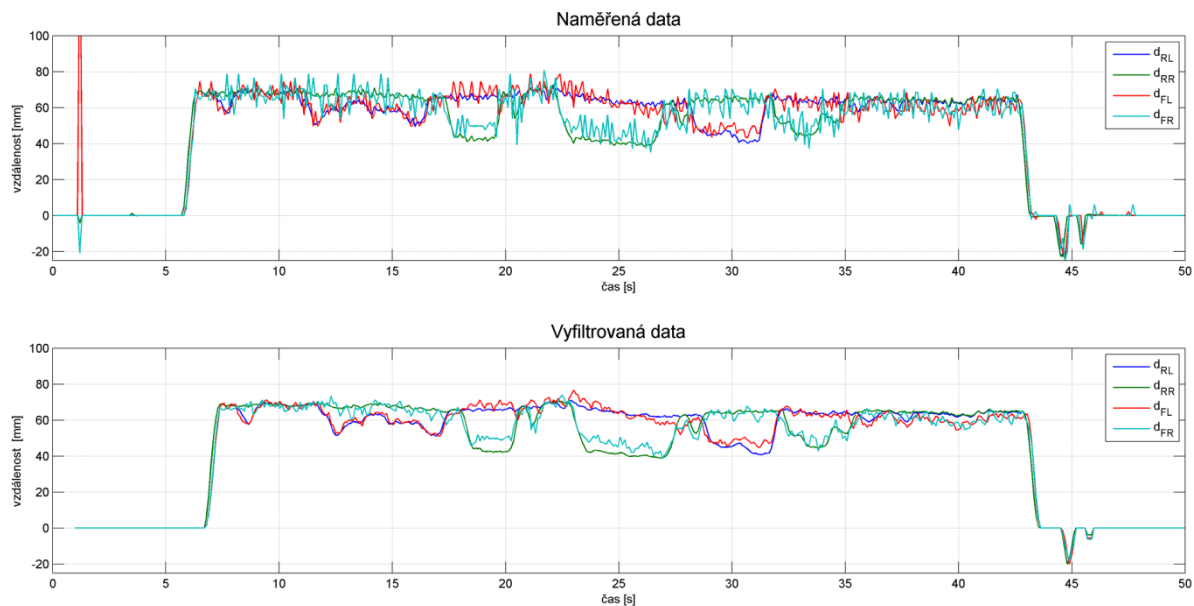
Po této operaci se však může stát, že přírůstek d_n odpovídá větší rychlosti, než je maximální povolená. Pak se hodnota d_n přepíše na hodnotu z předchozího kroku.

6.2.6 VYHLAZENÍ SIGNÁLU

Následující filtr má za úkol vyhladit signál do podoby, kdy šum nebude znatelně ovlivňovat odometrické modely. Pro tento účel jsem použil plovoucí průměr, jehož řád lze při každé simulaci nastavit v závislosti na citlivosti metody na zašuměná data.

6.2.7 KONTROLA SPRÁVNOSTI SMYSLU ZATÁČENÍ

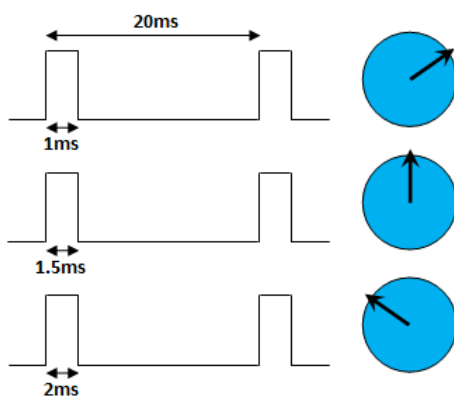
Plovoucí průměr má za následek setrvačnost signálu, což může například při rychlé změně směru robota způsobit situaci, kdy už robot zatáčí na druhou stranu, ale v simulaci se stále počítá s původním směrem, což způsobuje relativně velké chyby v trasování. Pokud je u některého z párů kol zaznamenána taková situace, ujetá vzdálenost obou kol se zamění.



Obr. 41 Filtrace naměřeného signálu bez převzorkování při použití plovoucího průměru 3. Řádu

6.3 CHARAKTERISTIKA ŘÍZENÍ

Aby odometrické modely fungovaly co nejlépe, potřebujeme (při zanedbání skluzů pneumatik) znát přesné natočení páky řídicího serva. To je řízené PWM signálem o frekvenci 50 Hz, což odpovídá periodě 20 ms. Úhel natočení se nastavuje délkou pracovního cyklu, jehož dolní, resp. horní limit jsou nejčastěji 1, resp. 2 ms. Závislost délky pulsu na úhlu natočení je lineární. [25]



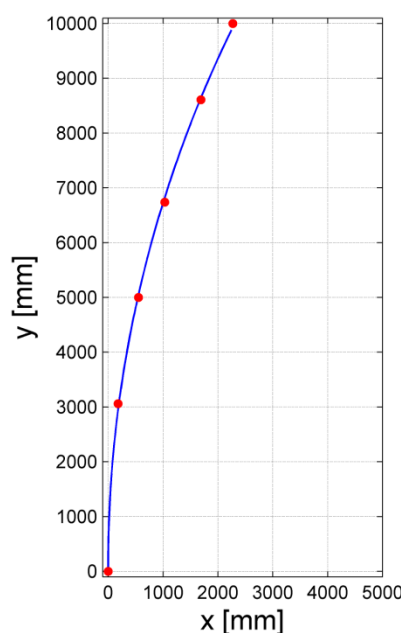
Obr. 42 Charakteristika modelářského serva [26]

Naším úkolem je nalézt takovou charakteristiku natočení páky serva, která by eliminovala nepřesnosti sestavy přední nápravy, skluzu pneumatik na různých površích a především úhel nasazení páky serva na hřídel. Jelikož předpokládám pouze malé nepřesnosti v oblasti geometrie nápravy, bude hledaná závislost lineární.

Pro určení charakteristiky řízení s původními koly na asfaltu jsem použil odometrický model vycházející z Ackermannova řízení, který předpokládá střed zatáčení na normále zadních kol. Byly provedeny 3 jízdy robotem, vždy s konstantním řídicím signálem serva po celou dobu jízdy. První jízda byla s koly natočenými plně vlevo (délka pracovního pulsu 1,937 ms, průměr zatáčení 1620 mm), druhá s koly natočenými plně vpravo (délka pulsu 1,204 ms, průměr zatáčení 1450 mm) a nakonec jízda s pracovním pulsem 1,57 ms, u které byla zaznamenávána trajektorie.

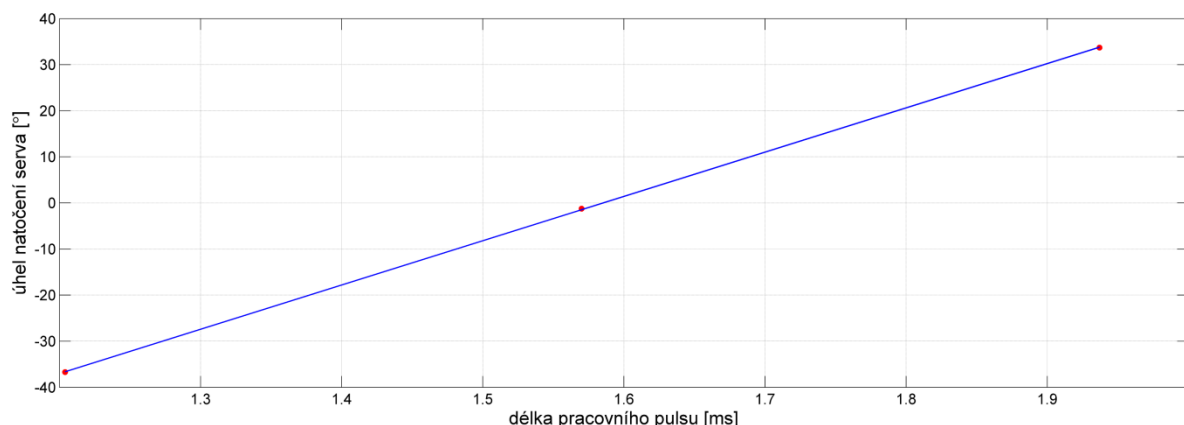
Úhel natočení serva byl u prvních dvou případů volen tak, aby kružnice, kterou robot opisuje, měla žádaný průměr. V případě zatáčení plně vlevo odpovídal průměru 1620 mm úhel natočení $33,7^\circ$, v případě zatáčení vpravo průměru 1450 mm odpovídal úhel $-36,7^\circ$.

U třetího případu byl úhel natočení páky serva volen tak, aby simulace jízdy robota co nejlépe kopírovala naměřené body trajektorie (**Obr. 43**). Nejlepší shoda nastala při úhlu $-1,25^\circ$.



Obr. 43 Naměřené body trajektorie (červené body) a simulovaná trajektorie (modrá křivka) při úhlu natočení serva $-1,25^\circ$

Délky pracovních pulsů a jejich příslušné úhly natočení byly vyneseny do grafu a proloženy přímkou, jak je vidět na **Obr. 44**.



Obr. 44 Závislost úhlu natočení páky serva v závislosti na délce řídicího pulsu

Rovnice proložené přímkou má pro úhel ve stupních tvar (82), pro úhel v radiánech pak (83).

$$y_{deg} = 96,043x - 152,237 \quad (82)$$

$$y_{rad} = 1,676x - 2,657 \quad (83)$$

Charakteristiku řízení pro ostatní povrchy jsem dělal jiným způsobem, protože estimace z maximálních natočení kol nefungovala dostatečně přesně. Nalezení funkce natočení páky serva v závislosti na délce řídicího pulsu bylo provedeno z jízd po předem definovaných bodech. Jako počáteční odhad pro hledání charakteristiky byly použity body z charakteristiky na asfaltovém povrchu.

Předpokladem k hledání charakteristiky řízení byl větší prokluz kol než na asfaltu, z čehož vyplývá menší velikost úhlu natočení páky serva při nezměněné délce pracovního pulsu. Charakteristika byla určena vždy alespoň ze dvou nezávislých měření. Výsledky¹³ je možné vidět v tabulce níže.

Tab. 2 Charakteristika řízení pro různé povrchy a typy kol

	<i>Kola arsenal</i>	<i>Původní kola</i>
Dlažba	$y = 1,633x - 2,586$	$y = 1,617x - 2,560$
Tráva	$y = 1,581x - 2,499$	$y = 1,524x - 2,412$

¹³ Uvedené rovnice jsou vyjádřeny pro úhel natočení v radiánech.

6.4 VYHODNOCENÍ ODOMETRICKÝCH MODELŮ

Nyní již zbývá vyhodnotit naměřená data. U každé jízdy budou zakresleny body, kterými robot skutečně projel a spočtené trajektorie různých odometrických modelů. Ty jsou označeny následujícím způsobem.

- **Ackermann** – algoritmus z kapitoly *Střed na normále zadních kol*
- **Poměr d** – algoritmus z kapitoly *Střed z poměru ujeté vzdálenosti*
- **Posuvy** – algoritmus z kapitoly *Změna polohy robota z posuvů kol*
- **Rozdíl d** – algoritmus z kapitoly *Střed z rozdílu ujeté vzdálenosti*, kde je střed počítán z průsečíků páru pravých kol a páru levých kol
- **Rozdíl d 2** – stejný algoritmus, střed počítán z průsečíků párů levých, pravých, předních a zadních kol

Pod grafem je vždy zakreslen naměřený signál (včetně natočení páky serva) upravený výše popsaným filtrem¹⁴.

Trajektorie spočtená z modelu určujícího střed zatáčení z průsečíku tří kružnic není u žádného z měření zobrazena, protože se metoda výpočtu ukázala jako nespolehlivá. Důvodem je, že při dané přesnosti měření enkodérů není možné určit průsečík, tudíž řešením kvadratické rovnice je komplexní číslo.

Odometrickým modelům byly na základě jejich ladění přiřazeny řády plovoucího průměru, se kterými dosahovaly nejpreciznějších výsledků. Ukázalo se, že tyto hodnoty jsou optimální nezávisle na povrchu vozovky nebo typu kol. Filtér na umělé snížení vzorkovací frekvence nebylo třeba použít. Řády filtru pro jednotlivé metody jsou vidět v **Tab. 3**.

Tab. 3 Optimální řád filtru plovoucí průměr pro jednotlivé odometrické modely

<i>Metoda</i>	<i>Ackermann</i>	<i>Poměr d</i>	<i>Posuvy</i>	<i>Rozdíl d</i>	<i>Rozdíl d 2</i>
Řád filtru	<i>1</i>	<i>12</i>	<i>1</i>	<i>8</i>	<i>8</i>

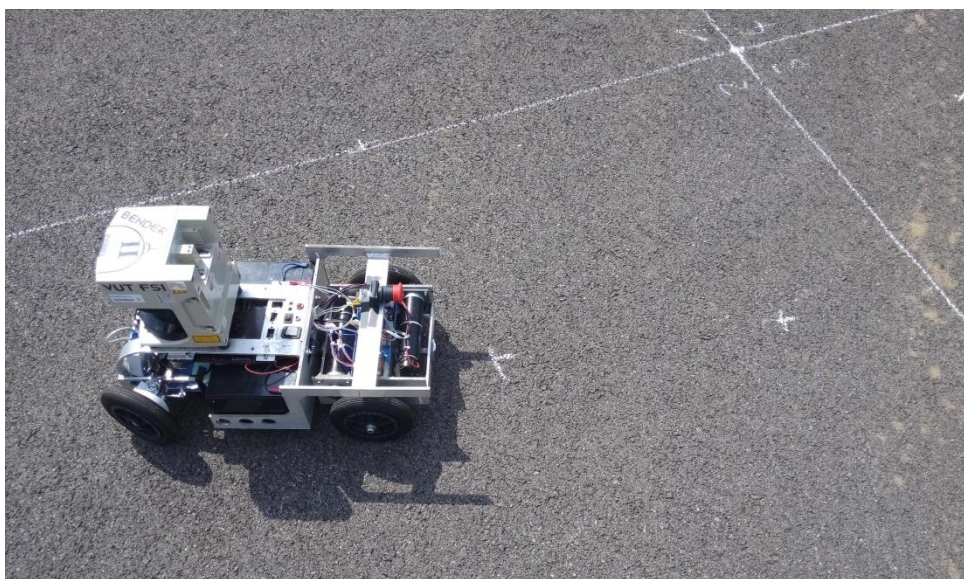
Bylo zjištěno, že při nízkých rychlostech přestávají algoritmy počítající střed zatáčení z rozdílu, resp. poměru ujeté vzdálenosti předních kol správně fungovat. V oblasti nízkých rychlostí (pod $0,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) byly proto nahrazeny modelem uvažujícím střed zatáčení na normále zadních kol.

¹⁴ U zobrazeného signálu nebylo použito převzorkování ani vyhlazení plovoucím průměrem.

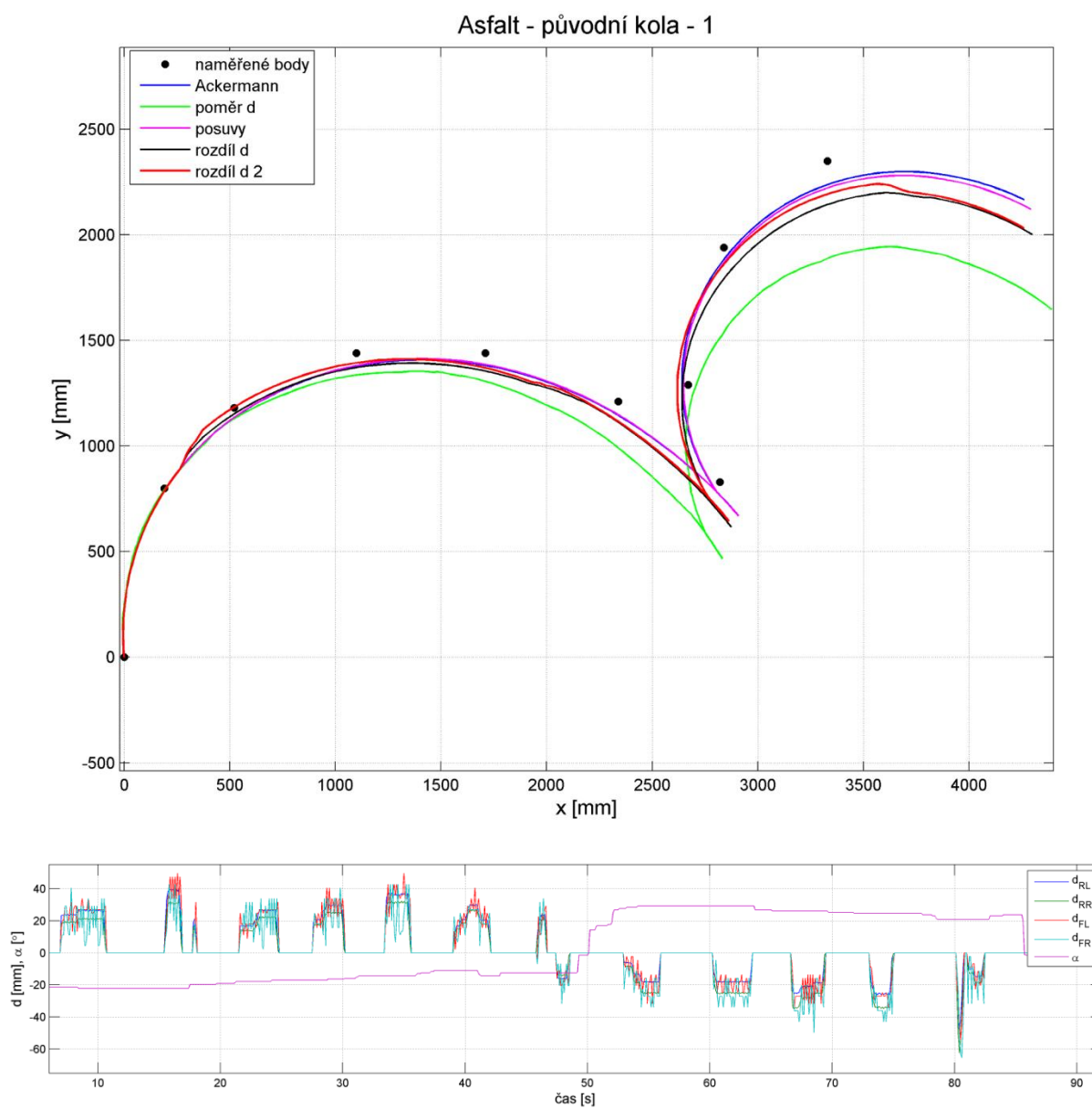
6.4.1 MĚŘENÍ NA ASFALTU S PŮVODNÍMI KOLY

Měření na asfaltu probíhalo dvěma způsoby. Prvním byla jízda robota, ve které se zaznamenávala jeho poloha, takže robot vždy po ujetí krátkého úseku zastavil (**Obr. 46, Obr. 48**). To mohlo do jisté míry ovlivnit odometrické modely, protože při nízkých rychlostech byl model přepínán do algoritmu počítajícího střed na normále zadních kol.

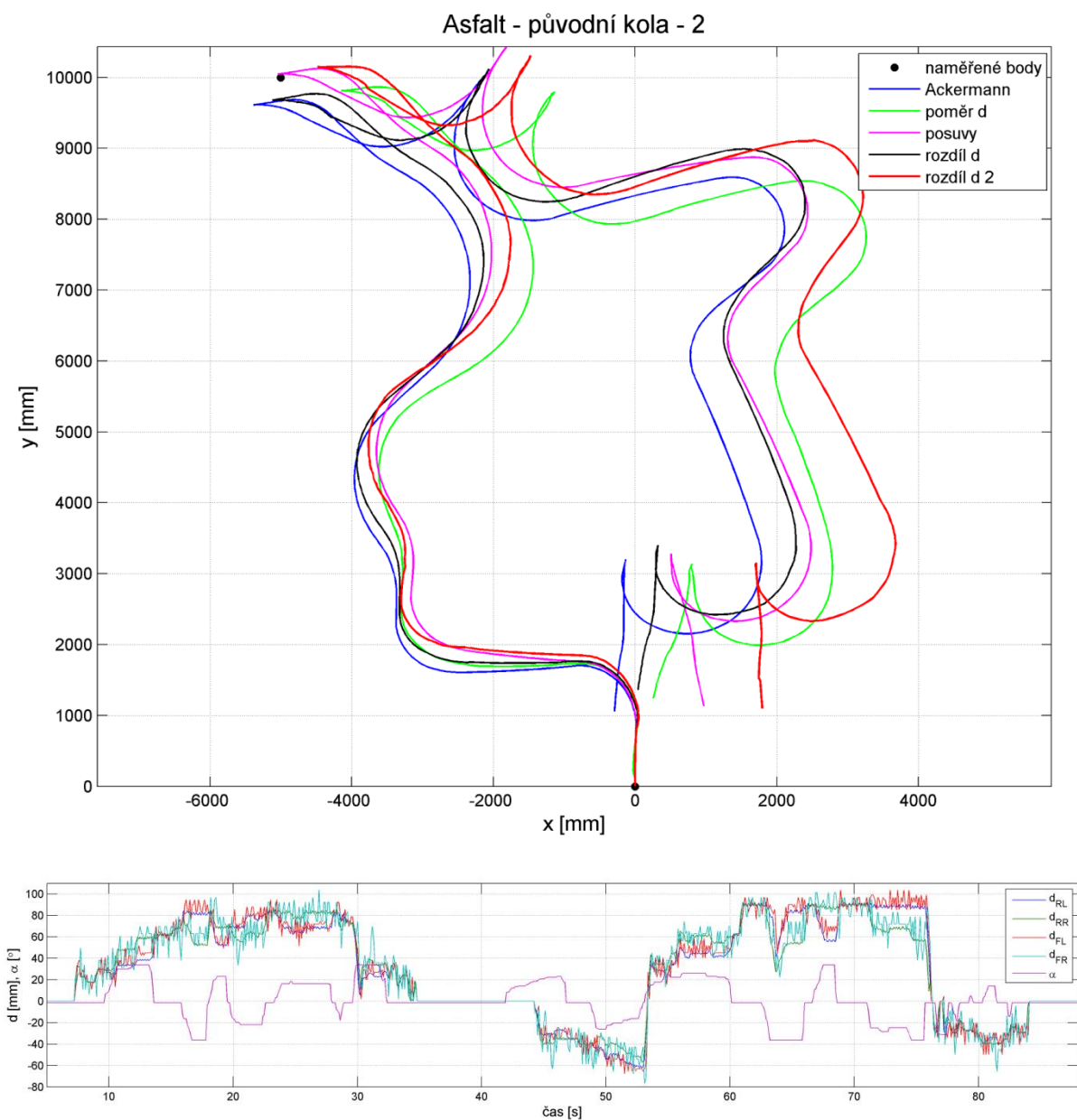
Druhým způsobem byla jízda robota do předem definovaných souřadnic (**Obr. 47, Obr. 49**). Robot zastavil vždy až po dosažení určené souřadnice, takže ovlivnění přepínáním modelu lze považovat za zanedbatelné.



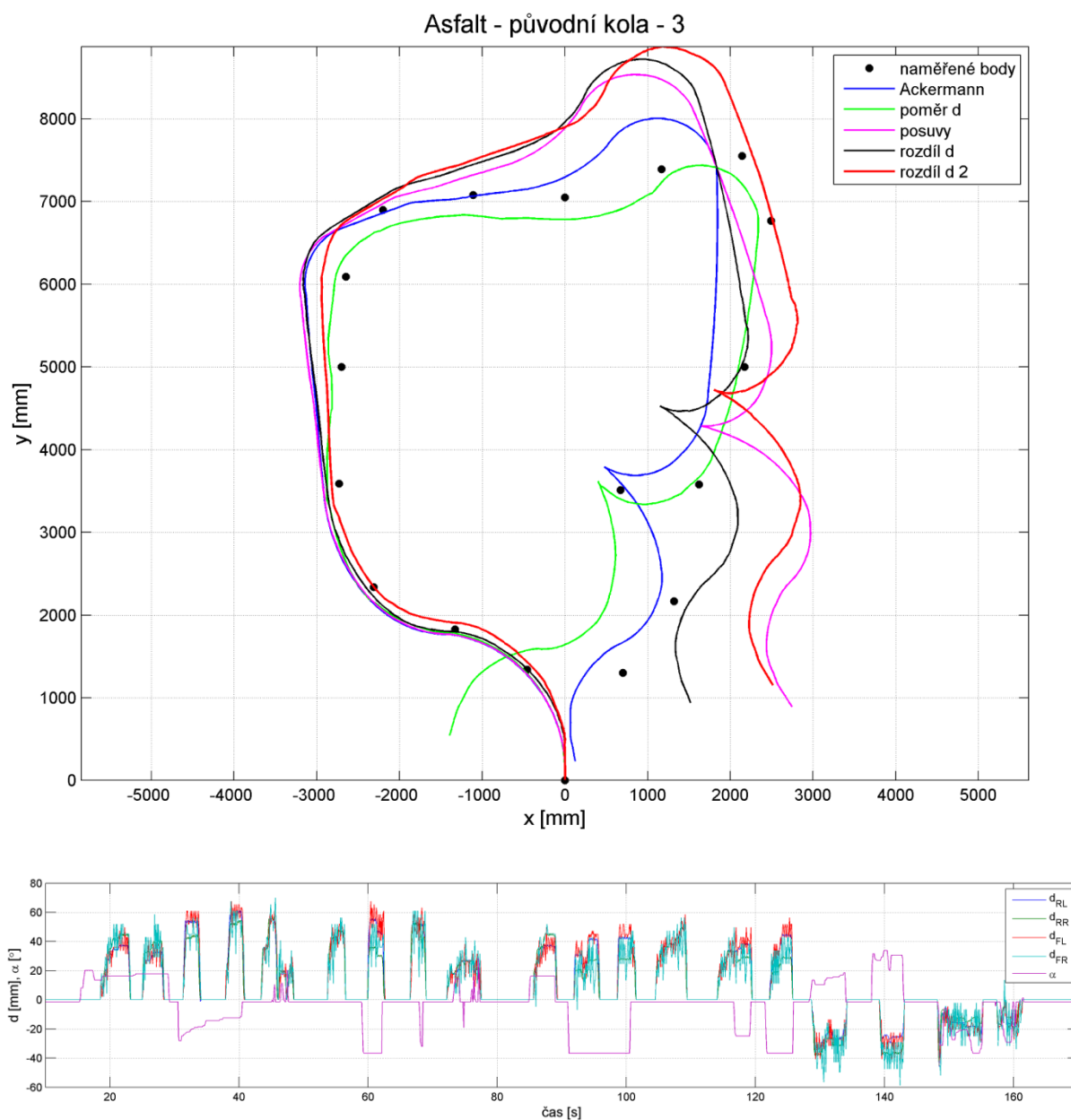
***Obr. 45** Měření souřadnic na asfaltu – robot je osazen původními koly*



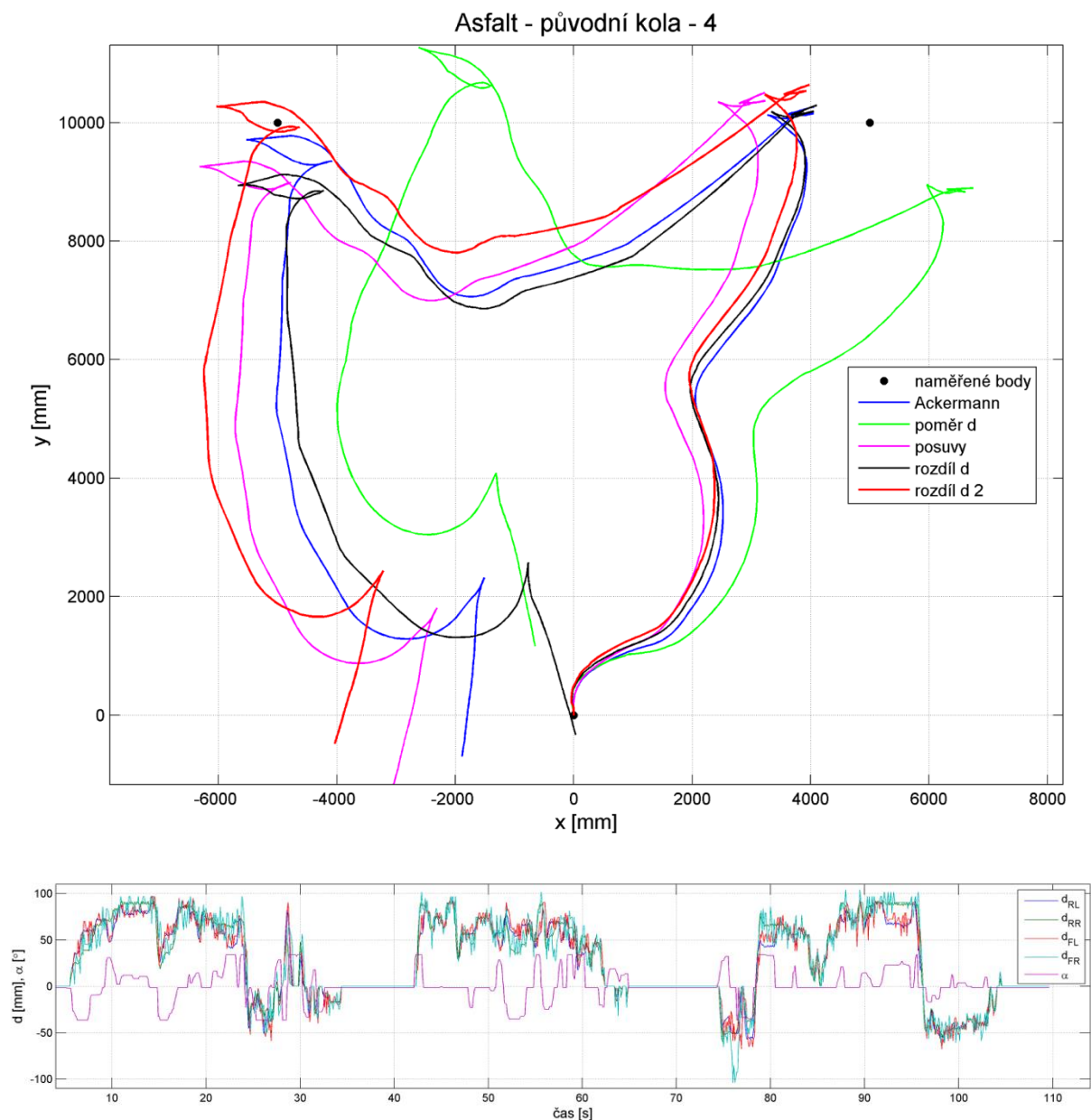
Obr. 46 Měření 1 na asfaltu s původními koly, jízda vpřed doprava a vzad doleva



Obr. 47 Měření 2 na asfaltu s původními koly, jízda do souřadnice $[-5000, 1000]$ a zpět na počátek



Obr. 48 Měření 3 na asfaltu s původními koly

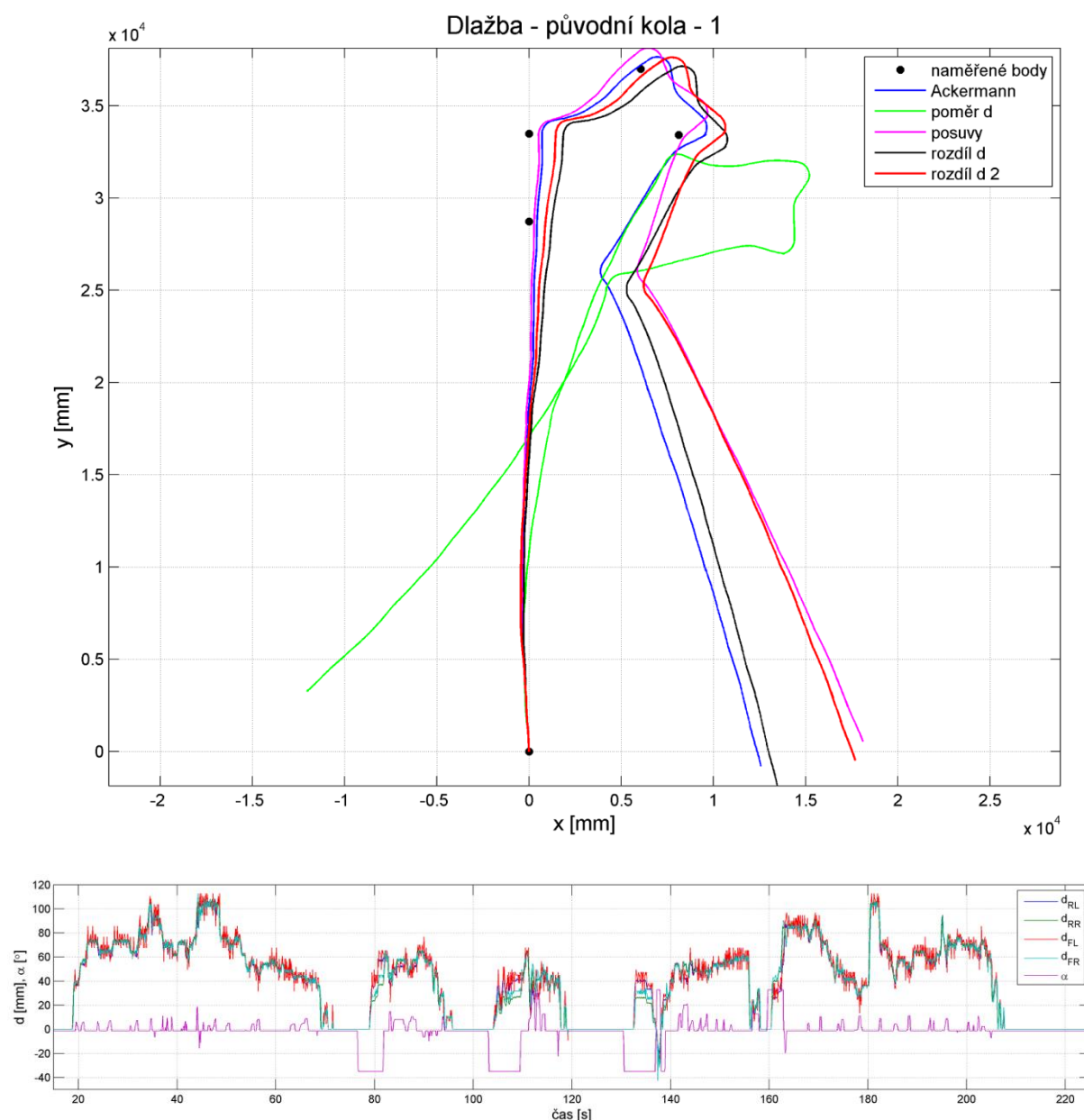


Obr. 49 Měření 4 na asfaltu s původními koly – jízda do daných souřadnic a zpět do počátku

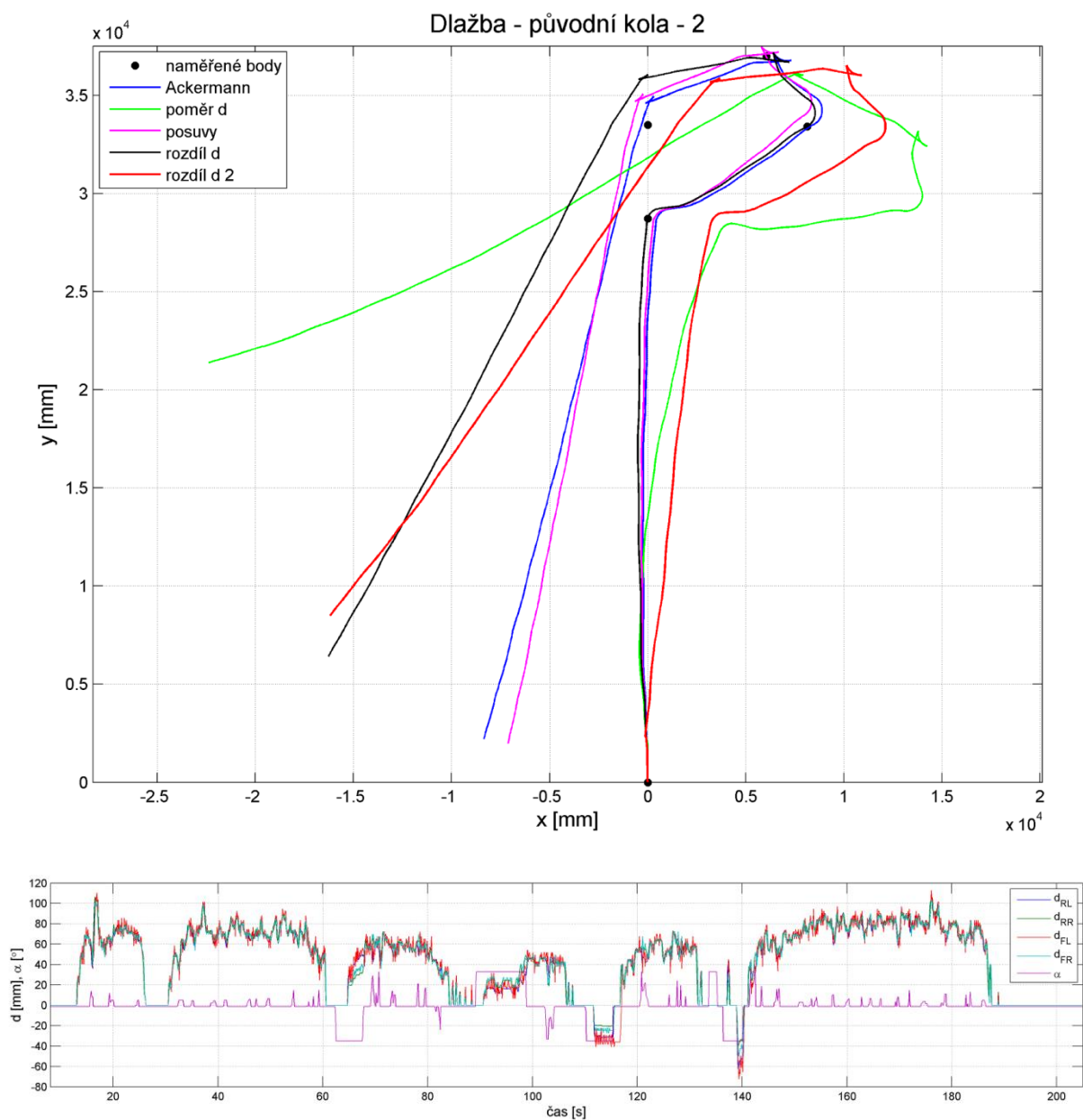
Jak lze z výše uvedených grafů vidět, nejlepších výsledků dosahovala *Ackermannova* metoda (modrá křivka) následována metodou *rozdíl d* (černá křivka). Nestabilně se chovala metoda *poměr d*, která měla tendence uhýbat.

6.4.2 MĚŘENÍ NA DLAŽBĚ S PŮVODNÍMI KOLY

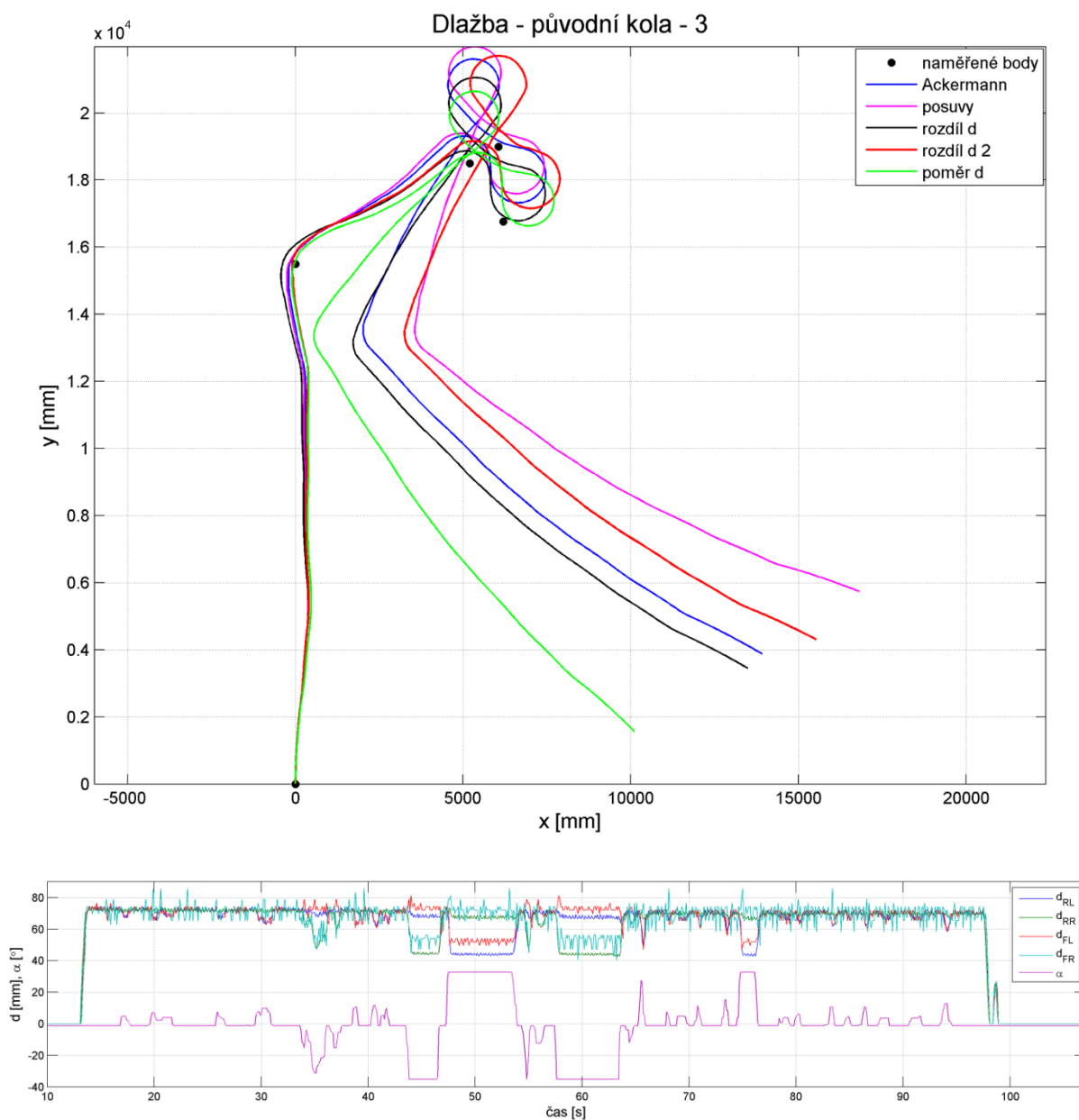
Pro všechny jízdy po dlažbě byly vyměřeny body, kterými měl robot projet. Počáteční i koncová souřadnice byly vždy $[0,0]$. V prvních dvou jízdách robot zastavoval na průjezdných bodech, ve třetí jimi projížděl bez zastavení. Dlouhý rovný úsek byl zahrnut kvůli vystředění charakteristiky řízení.



Obr. 50 Měření 1 s původními koly na dlažbě



Obr. 51 Měření 2 s původními koly na dlažbě



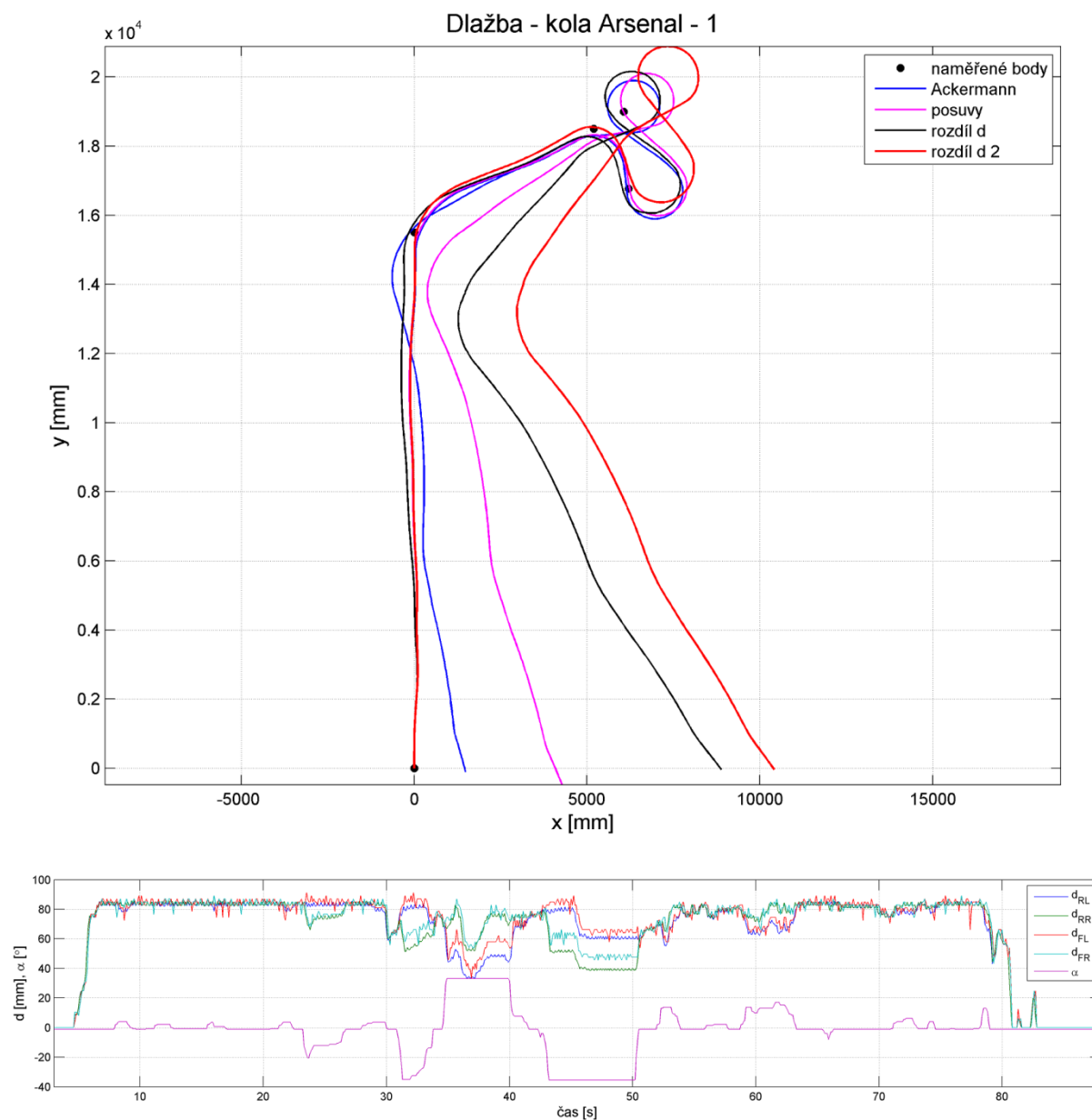
Obr. 52 Měření 3 na dlažbě s původními koly

I z jízdy na dlažbě se potvrzuje, že simulace algoritmem *poměr d* má tendenci divergovat, a to i na úseku, kdy jede robot rovně, což je důkazem o nevhodnosti tohoto řešení. O něco méně nestabilně se chovala metoda *rozdíl d 2*. Jako stabilní metoda se opět ukázal *Ackermann*, podobných výsledků dosahovala i metoda *rozdíl d* .

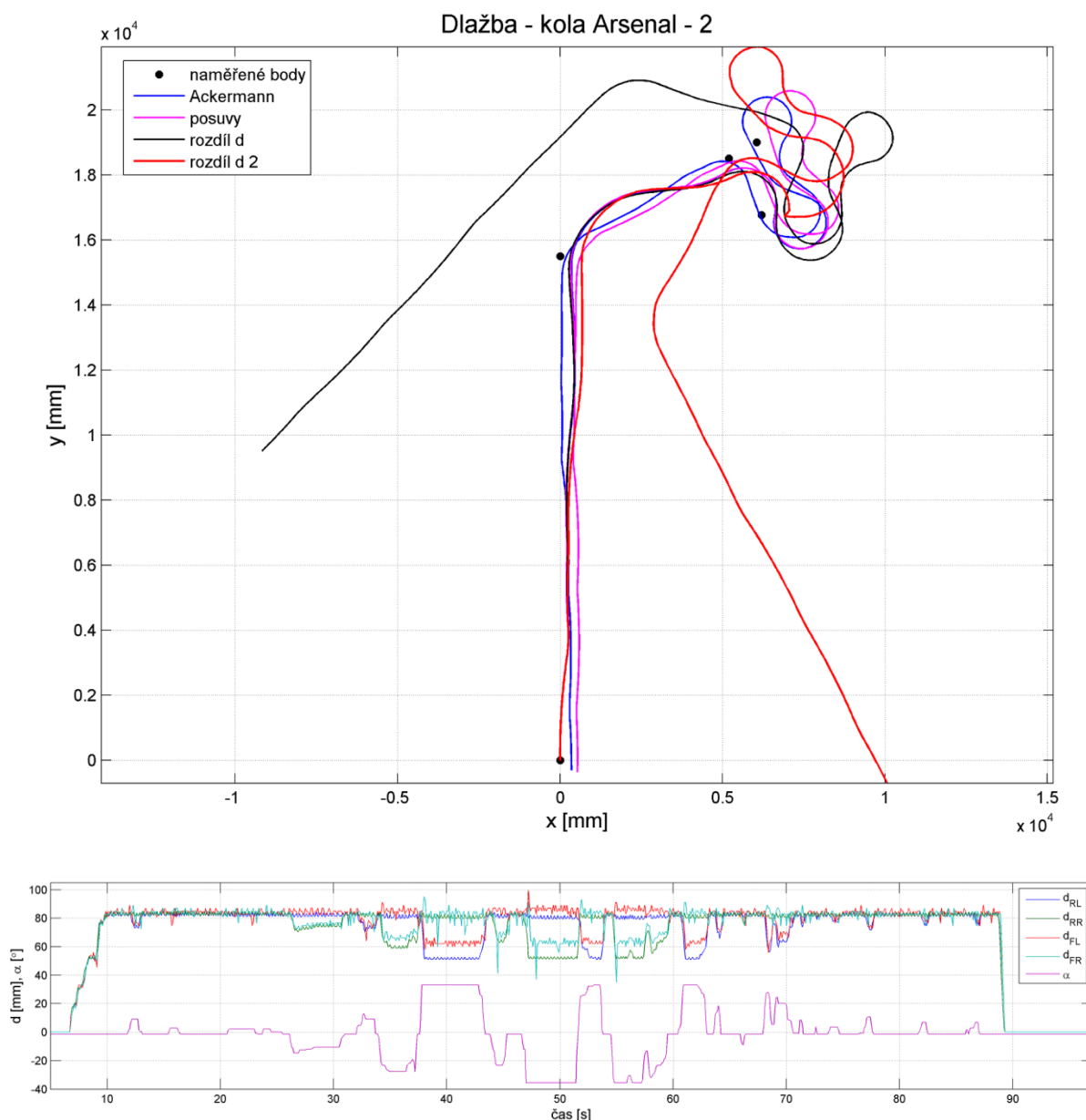
6.4.3 MĚŘENÍ NA DLAŽBĚ S KOLY ARSENAL

Jízdy s koly Arsenal probíhaly stejným způsobem, jako s původními koly. Avšak při zpracování dat z tratě na **Obr. 50** a **Obr. 51** bylo zjištěno, že jsou data příliš zašuměná a modely na nich nefungují. Proto jsou zde uvedeny jen jízdy po trati shodné s **Obr. 52**.

Výsledek algoritmu *poměr d* již není zobrazen, protože se ukázalo, že není spolehlivý.



Obr. 53 Měření 1 na dlažbě s koly Arsenal



Obr. 54 Měření 2 na dlažbě s koly Arsenal

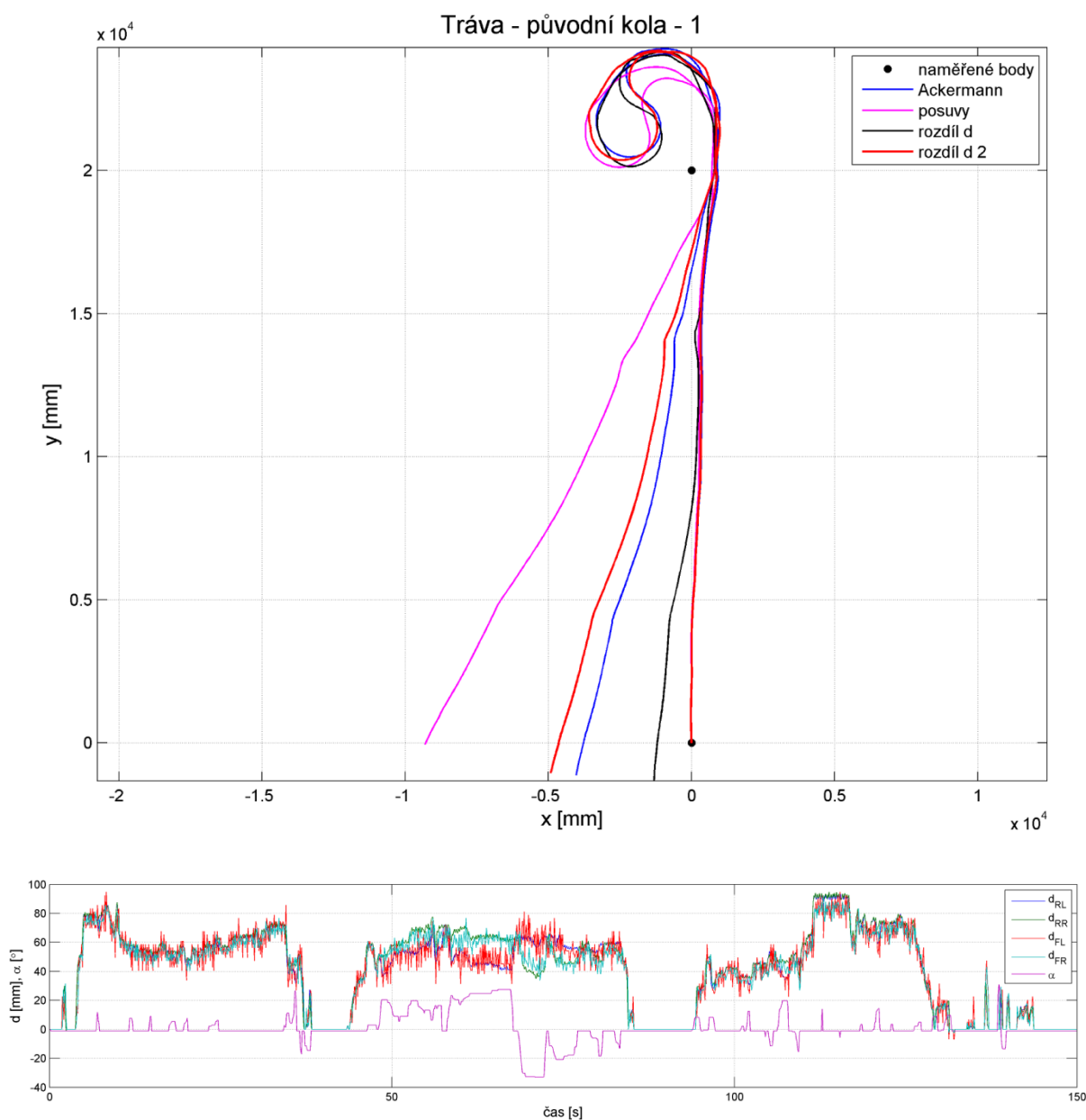
Z výsledků lze usoudit, že nejlépe opět funguje *Ackermann*, relativně přesný se jeví i výsledek z posuvů. Nestabilně se chovají obě metody počítající střed zatáčení z rozdílu ujeté vzdálenosti.

Z naměřeného signálu je možné pozorovat, že při zatáčení mívají zadní kola viditelně menší ujetou vzdálenost, než přední. Z toho lze usuzovat, že přesné řešení se blíží *Ackermannovu* modelu, jehož ujeté dráhy zadních kol jsou vždy menší než u předních kol.

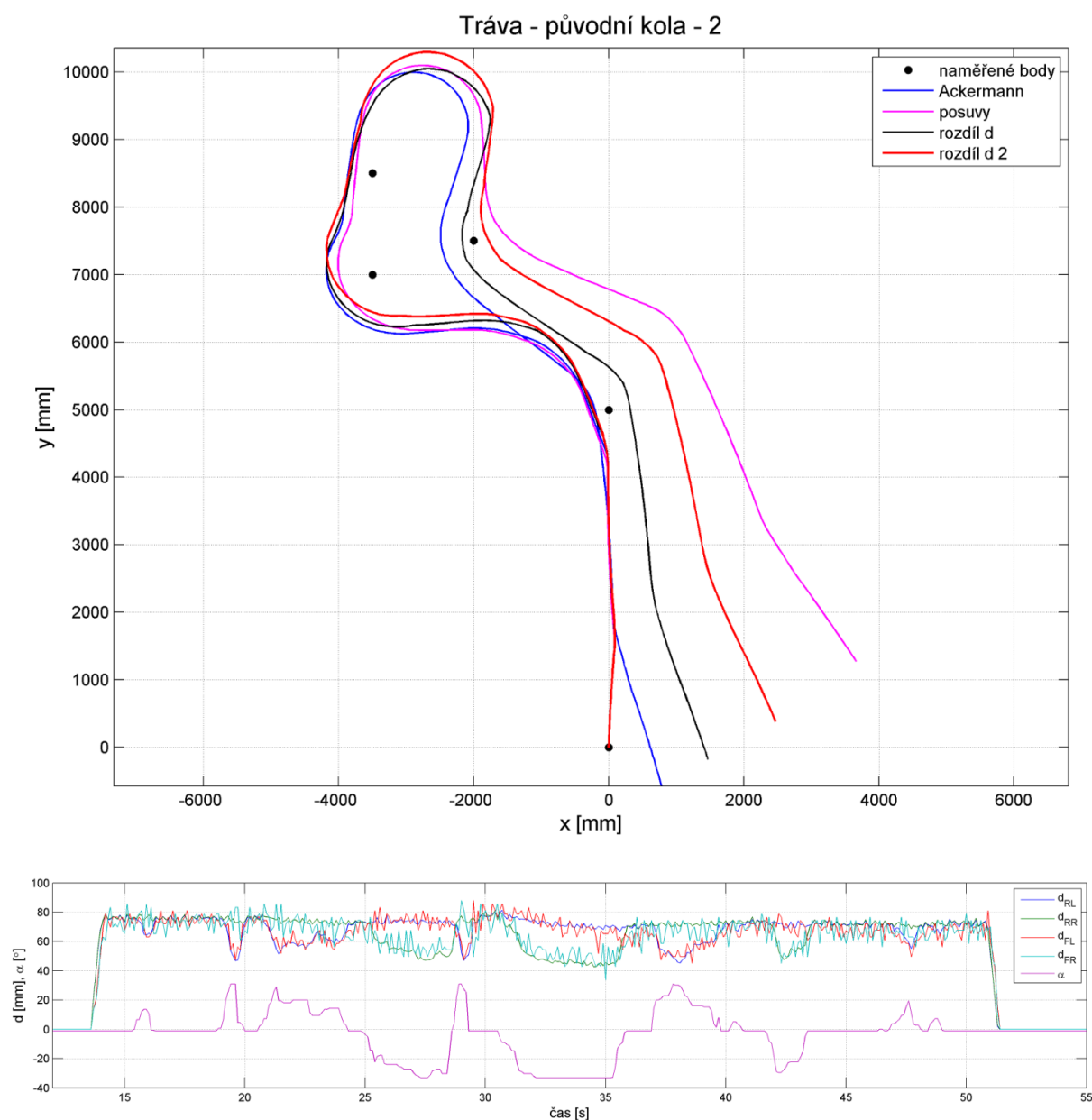
Výsledky též ukazují, že použití kol Arsenal se jeví pro jízdy po dlažbě jako výhodnější. Tomuto tvrzení navíc přispívá fakt, že rovnice charakteristiky řízení na daném povrchu z **Tab. 2** má větší sklon (robot více zatáčí, což znamená, že méně klouže).

6.4.4 MĚŘENÍ NA TRÁVĚ S PŮVODNÍMI KOLY

Při měření na trávě bylo možné pozorovat o něco větší šumění na předních enkodérech, než při jízdě po asfaltu nebo dlažbě. Tento jev je způsoben tím, že na kola na takto nerovném povrchu působí podstatně větší síly, díky kterým se kolo může z důvodu drobných vůlí v jeho uchycení natáčet. Tento pohyb může způsobit ztrátu kroku (viz kapitola *Ochrana proti ztrátě kroku*), kterou obslužné zařízení zaznamená a při následující detekované hraně provede korekci. Tato korekce se projevuje drobnými zákmity s amplitudou přibližně 10 mm. Pozorovat ji lze například v naměřeném signálu z **Obr. 55** pro levé přední kolo.



Obr. 55 Měření 1 na trávě s původními koly



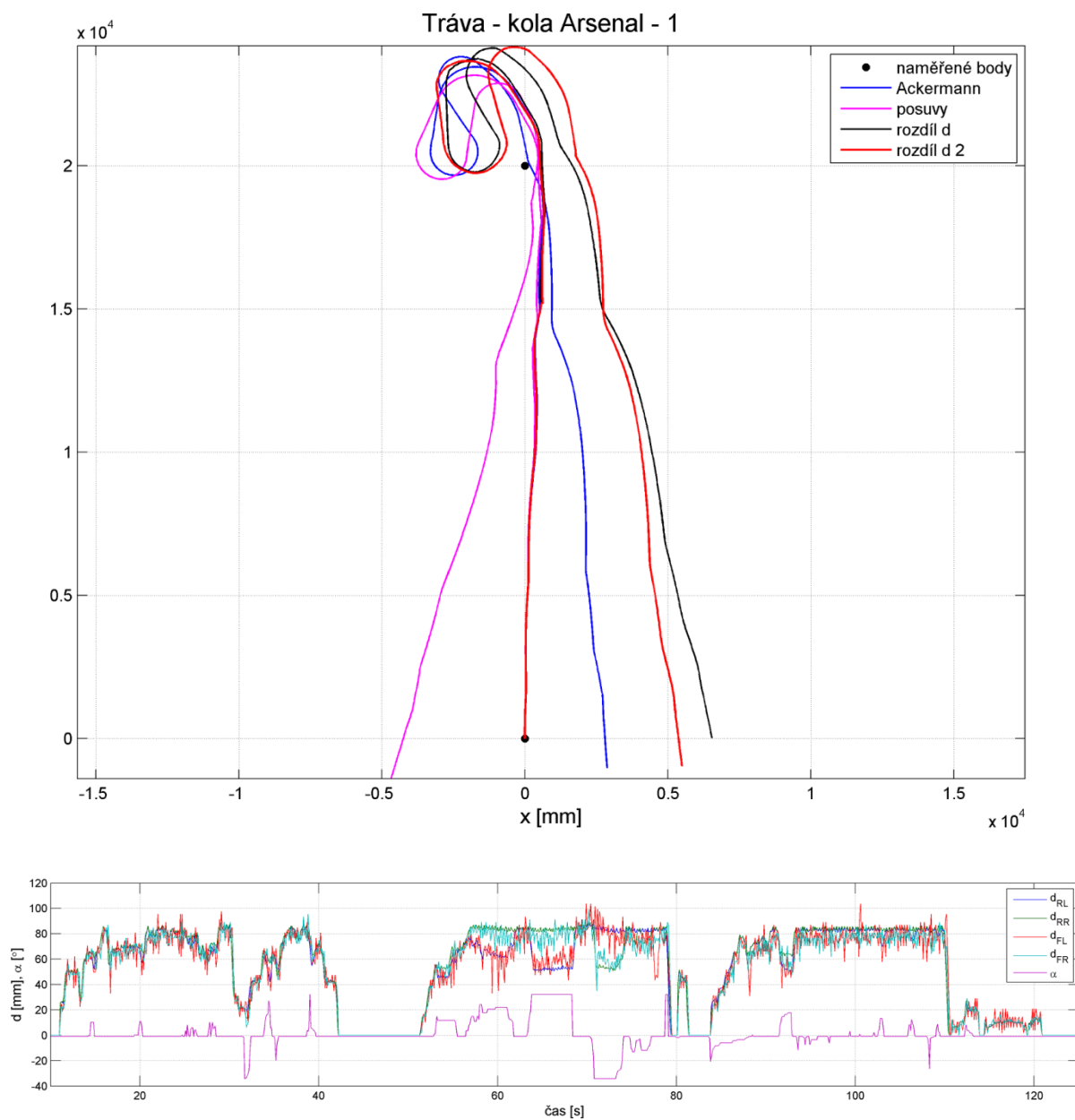
Obr. 56 Měření 2 na trávě s původními koly

V naměřeném signálu můžeme pozorovat, že při zatáčení na trávě už není ujetá vzdálenost předních kol výrazně vyšší, než u kol zadních. Z toho lze usuzovat, že by metoda *Ackermann* nemusela být tou nejpřesnější. Podíváme-li se na výsledky simulací, opět tato metoda dosahuje relativně přesných výsledků. Velmi přesná je však i metoda *rozdíl d*.

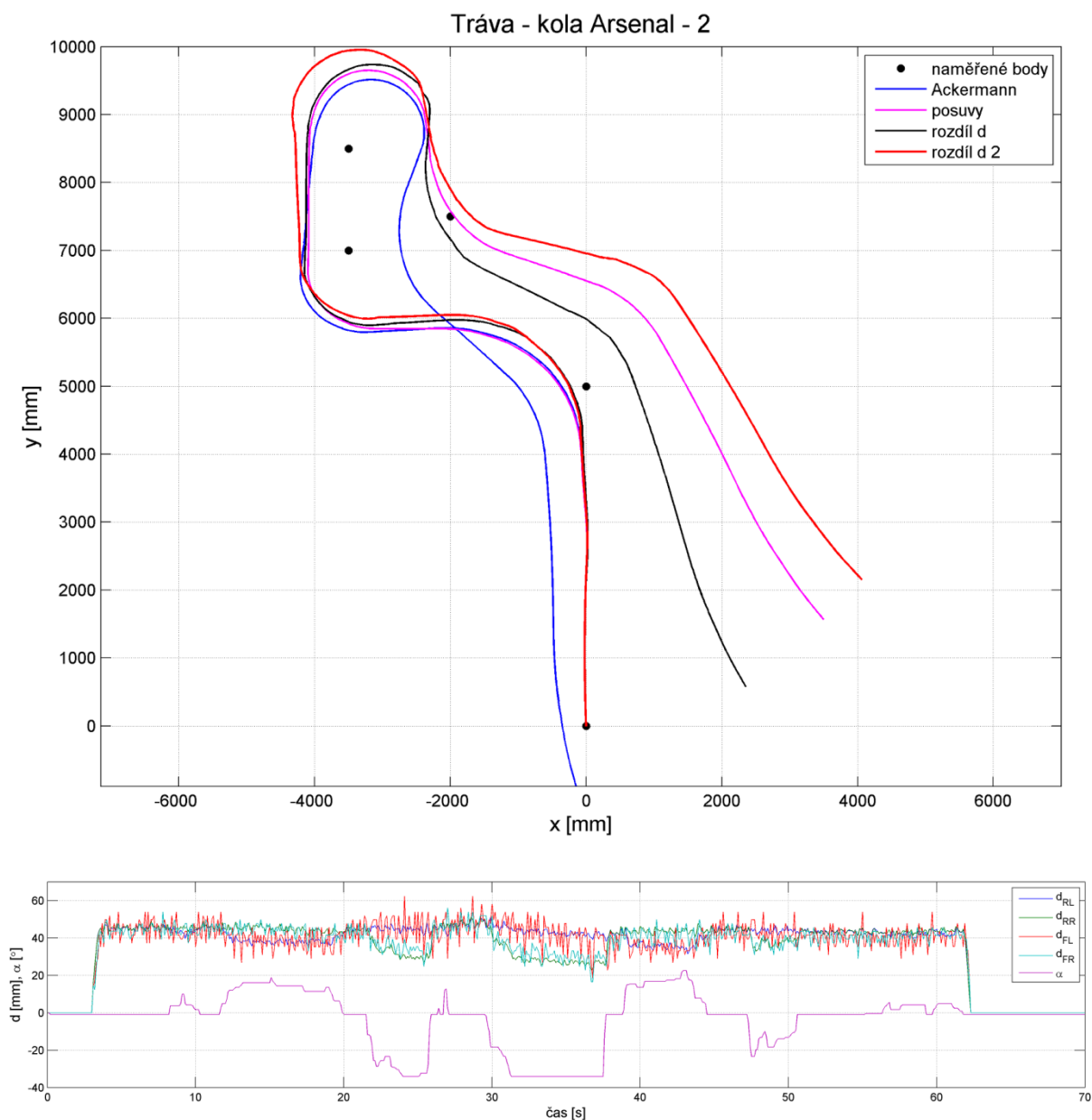
Lze pozorovat, že vlivem prokluzu kol se reálná ujetá vzdálenost neshoduje se simulovanou. Tento prokluz se ale poměrně těžko detekuje, protože je malý (v signálu nejsou vidět žádné výrazné špičky) a navíc ho nelze považovat za konstantní během jízdy.

6.4.5 MĚŘENÍ NA TRÁVĚ S KOLY ARSENAL

Aby byly výsledky lépe porovnatelné, měření proběhlo za stejných podmínek a na stejných tratích jako při měření s původními koly.



Obr. 57 Měření 1 na trávě s koly Arsenal



Obr. 58 Měření 2 na trávě s koly Arsenal

Z měření na trávě s koly Arsenal lze jednoduše rozhodnout, že největší shoda nastala opět při použití Ackermannova modelu. U zbylých metod je možné pozorovat, že prudké zatáčky nejsou dotočeny, čímž vzniká velká směrová odchylka. Při ladění charakteristiky řízení se však nepovedlo najít takové nastavení, se kterým by modely fungovaly lépe.

Odometrické modely fungují na trávě obecně hůře, protože dochází k většímu prokluzu kol a především je jízda výrazně ovlivněna nerovnostmi povrchu. Drobného zlepšení by bylo možné dosáhnout výměnou řídicího serva za silnější, aby byla kola pevněji držena ve svém směru.

Porovnáme-li dosažené výsledky původních kol i kol Arsenal na trávě, můžeme považovat původní kola za vhodnější pro jízdu na tomto povrchu.

ZÁVĚR

V práci byl nejdříve představen autonomní mobilní robot Bender 2 a poté byly shrnuty teoretické poznatky z oblasti Ackermannova řízení a měření ujeté vzdálenosti.

Dále byly prezentovány provedené konstrukční úpravy přední nápravy, které měly vymezit vůli a zpřesnit řízení vozidla. Současně byly navrženy a realizovány nové náboje předních kol kvůli snadnější výměně kol. Byla také upravena geometrie řízení – původní paralelní řízení nebylo zcela vhodné, protože z jeho podstaty vyplývají relativně vysoké skluzové úhly kol. Nové řízení bylo koncipováno tak, aby průsečík normál předních kol byl co nejblíže normále zadních kol, díky čemuž se sníží skluzy kol a zvýší přesnost odometrických modelů.

Byly navrženy a realizovány enkodéry předních kol, jejichž rozlišení činí 200 dílků na otočku. Enkodéry byly zakryty stínítky, která zlepšují funkčnost použitých světelných závor a chrání proti nečistotám. Obsluhu enkodérů včetně korekčních mechanismů má na starosti vývojová deska Nucleo F303K8, která pomocí sériového portu komunikuje s nadřazeným zařízením dle předepsaného protokolu. Kód pro obsluhu a komunikaci enkodérů byl psán tak, aby pracoval v reálném čase (využitím knihovny RTOS). Obsluha i komunikace byly rozděleny do samostatných knihoven.

Zároveň bylo navrženo a popsáno 5 odometrických modelů, které byly později testovány a laděny na základě naměřených dat. Z nich se ukázal jako nejspolehlivější model uvažující střed zatáčení vozidla na normále zadních kol.

Poslední část se zabývá měřením a vyhodnocením dat. Nejdříve byla provedena kalibrace enkodérů, poté byla stanovena charakteristika řízení. Jelikož se různá kola na různých površích chovala rozdílně, každé z těchto kombinací byla nalezena unikátní charakteristika, která tento vliv minimalizovala. Protože signál naměřený enkodéry měl drobné nedostatky, byl vytvořen filtr, který dokáže spolehlivě odstranit nejhrubší chyby. Algoritmy vyhodnocování naměřených dat byly odladěny na datech z měření na asfaltové ploše. Následovala další měření s různými koly na různých površích, kde byly tyto algoritmy testovány a vyhodnocovány. Z dosažených výsledků bylo usouzeno, že pro jízdu na dlažbě jsou vhodnější kola Arsenal, naopak pro jízdu na trávě dosahují lepších výsledků původní kola.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] Learn About Autonomous Cars. In: *Open Roboethics Initiative* [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://www.openroboethics.org/autonomous-cars/>
- [2] The DARPA Grand Challenge: Ten Years Later. In: *DARPA* [online]. 2014 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.darpa.mil/news-events/2014-03-13>
- [3] A Brief History of Autonomous Vehicle Technology. In: *Wired* [online]. 2016 [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <https://www.wired.com/brandlab/2016/03/a-brief-history-of-autonomous-vehicle-technology/>
- [4] Robotour. In: *Robotika.cz* [online]. 2017 [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://robotika.cz/competitions/robotour/cs>
- [5] MEINDL, J. *Návrh a realizace vestavěného systému řízení mobilního robotu Bender II*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 47 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Stanislav Věchet, Ph.D..
- [6] MILLIKEN, William F. a Douglas L. MILLIKEN. *Race Car Vehicle Dynamics*. Warrendale: SAE International, 1994. ISBN 9781560915263.
- [7] VLK, F. *Dynamika motorových vozidel*. Vyd. 2. Brno: Prof. Ing. František Vlk, DrSc., nakladatelství a vydavatelství, 2006, 432 s. ISBN 80-239-0024-2.
- [8] GILLESPIE, T. *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. 1st ed. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1992, 495 p. ISBN 15-609-1199-9.
- [9] PACEJKA, H. *Tyre and vehicle dynamics*. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006, xiii, 642 p. ISBN 978-075-0669-184.
- [10] How An Encoder Functions. *CUI.com* [online]. [cit. 2017-03-21]. Dostupné z: <http://www.cui.com/product-spotlight/capacitive-modular-encoders-amt10-and-amt11-series>
- [11] LOCKER, Martin. Inkrementální enkodér. *Robot klub Rychnov* [online]. 2009 [cit. 2017-03-21]. Dostupné z: <http://robotika.vosrk.cz/guide/sensors/decode/cs>
- [12] EITEL, Elisabeth. Basics of Rotary Encoders: Overview and New Technologies. *Machine Design* [online]. 2014 [cit. 2017-03-22]. Dostupné z: <http://www.machinedesign.com/sensors/basics-rotary-encoders-overview-and-new-technologies-0>
- [13] Detection of rotation speed. *Asahi Kasei Microdevices Corporation* [online]. [cit. 2017-03-25]. Dostupné z: <http://www.machinedesign.com/sensors/basics-rotary-encoders-overview-and-new-technologies-0>
- [14] KLÍMA, Bohumil. *Mikroprocesorové řízení elektrických pohonů*. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně, 2014.

- [15] POPOVIĆ, Radivoje S. Integrated Hall Magnetic Angle Sensors. *Electronic Components and Materials*, 2014, 44.4: 257-263.
- [16] OYRER, Heinz. Magnetic Position Sensing. In: *AMS* [online]. 2014 [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: <https://www.scribd.com/document/321854940/Ams-Position-Sensor-Overview>
- [17] STM32 F303K8. In: *ST* [online]. [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <http://www.st.com/en/microcontrollers/stm32f303k8.html>
- [18] Nucleo F303K8. In: *Inex* [online]. [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <http://inex.co.th/shop/media/catalog/product/cache/1/image/9df78eab33525d08d6e5fb8d27136e95/n/u/nucleo-f303.jpg>
- [19] TCST1103. In: *DigiKey* [online]. [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <http://media.digikey.com/Photos/Vishay%20Photos/TCST1103.JPG>
- [20] TCST1103 Datasheet. In: *Vishay* [online]. 2017 [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <http://www.vishay.com/docs/83764/tcst1103.pdf>
- [21] HEDS 5540 Datasheet. In: *Broadcom* [online]. 2014 [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <https://docs.broadcom.com/docs/AV02-1046EN>
- [22] Encoder HEDS 5540. In: *Maxon Motor* [online]. [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: http://www.maxonmotor.com/medias/sys_master/root/8800127156254/Encoder-HEDS-5540-500Imp-3K-Detail.jpg
- [23] THRUN, S., BURGARD, W., FOX, D. Probabilistic Robotics. MIT Press, 2006. ISBN 978-0262201629
- [24] GREPL, Robert. *Kinematika a dynamika mechatronických systémů*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. ISBN 978-80-214-3530-8.
- [25] Řízení serva. *Robotika.cz* [online]. [cit. 2016-01-22]. Dostupné z: <http://robotika.cz/guide/servo/cs>
- [26] *PICCircuit* [online]. [cit. 2016-01-22]. Dostupné z: http://www.piccircuit.com/shop/picture/motor/servo_operation.png

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Tab. 4 Význam použitých veličin

<i>Označení</i>	<i>Jednotka</i>	<i>Veličina</i>
<i>a</i>	<i>[-]</i>	<i>lineární člen v rovnici přímky</i>
<i>A</i>	<i>[mm]</i>	<i>osa rotace těhlice</i>
<i>A_q</i>	<i>[-]</i>	<i>koeficient kvadratické rovnice</i>
<i>b</i>	<i>[mm]</i>	<i>konstantní člen v rovnici přímky</i>
<i>B</i>	<i>[mm]</i>	<i>kloub mezi řídící tyčí a ramenem těhlice</i>
<i>B_q</i>	<i>[-]</i>	<i>koeficient kvadratické rovnice</i>
<i>c</i>	<i>[-]</i>	<i>počet detekovaných hran příslušného enkodéru</i>
<i>C</i>	<i>[mm]</i>	<i>kloub mezi pákou serva a řídící tyčí</i>
<i>C_q</i>	<i>[-]</i>	<i>koeficient kvadratické rovnice</i>
<i>d</i>	<i>[mm]</i>	<i>ujetá vzdálenost kola za 1 periodu</i>
<i>D</i>	<i>[mm]</i>	<i>osa rotace serva</i>
<i>dif</i>	<i>[-]</i>	<i>diference</i>
<i>dx</i>	<i>[mm]</i>	<i>chybový vektor</i>
<i>e</i>	<i>[mm]</i>	<i>délka inkrementu</i>
<i>E</i>	<i>[mm]</i>	<i>absolutní chyba</i>
<i>i</i>	<i>[-]</i>	<i>pomocná veličina</i>
<i>I</i>	<i>[A]</i>	<i>elektrický proud</i>
<i>J</i>	<i>[mm]</i>	<i>Jacobiho matice</i>
<i>k</i>	<i>[-]</i>	<i>poměr ujetých vzdáleností předních kol</i>
<i>l</i>	<i>[mm]</i>	<i>rozvor vozidla</i>
<i>L₁</i>	<i>[mm]</i>	<i>délka ramene těhlice</i>
<i>L₂</i>	<i>[mm]</i>	<i>délka řídící tyče</i>
<i>L₃</i>	<i>[mm]</i>	<i>délka páky serva</i>
<i>L₄</i>	<i>[mm]</i>	<i>½ rozchodu kol</i>
<i>o</i>	<i>[mm]</i>	<i>vzdálenost kola od osy rotace těhlice</i>
<i>O1</i>	<i>[mm]</i>	<i>počátek pomocného souřadnicového systém</i>
<i>p_p</i>	<i>[mm]</i>	<i>vzdálenost styčných bodů předních kol</i>
<i>q</i>	<i>[-]</i>	<i>koeficient zesílení</i>
<i>Q</i>	<i>[mm]</i>	<i>vztažný bod</i>

R	[mm]	<i>poloměr zatáčení vozidla</i>
R_{Ω}	[Ω]	<i>elektrický odpor</i>
S	[mm]	<i>střed zatáčení vozidla</i>
S_{dF}	[mm]	<i>střed pomocné úsečky</i>
S_{dR}	[mm]	<i>střed pomocné úsečky</i>
S_F	[mm]	<i>průsečík normál předních kol</i>
S_{Sd}	[mm]	<i>střed mezi body S_{dF} a S_{dR}</i>
t	[mm]	<i>rozchod kol</i>
U	[V]	<i>napájecí napětí IR diody</i>
U_D	[V]	<i>úbytek napětí na IR diody</i>
U_r	[V]	<i>amplituda napájecího napětí</i>
U_{REF}	[V]	<i>napájecí napětí cívky</i>
U_{Sin}, U_{Cos}	[V]	<i>transformovaná napětí</i>
W	[mm]	<i>souřadnice styčného bodu kola</i>
x_{abs}	[mm]	<i>poloha x-ové souřadnice bodu v absolutním souřadnicovém systému</i>
y_{abs}	[mm]	<i>poloha y-ové souřadnice bodu v absolutním souřadnicovém systému</i>
δ	[rad]	<i>úhel natočení kol</i>
Δd	[mm]	<i>rozdíl ujeté vzdálenosti</i>
ΔQ	[rad]	<i>vektor obsahující přírůstky úhlů ϑ</i>
Δx	[mm]	<i>inkrement souřadnice x</i>
Δy	[mm]	<i>inkrement souřadnice y</i>
$\Delta \varphi$	[rad]	<i>inkrement úhlu ϕ</i>
ϑ_1	[rad]	<i>úhel natočení ramene těhlice</i>
ϑ_2	[rad]	<i>úhel mezi ramenem těhlice a řídicí tyčí</i>
φ	[rad]	<i>úhel mezi osou předního kola a těhlicí</i>
φ_{abs}	[rad]	<i>úhel natočení v absolutním souřadnicovém systému</i>
φ_r	[rad]	<i>úhel natočení resolveru</i>
ψ	[rad]	<i>pootočení bodu Q kolem S</i>
ψ_1	[rad]	<i>úhel pootočení vozidla</i>
ψ_Q	[rad]	<i>úhel mezi osou x a úsečkou RQ</i>

Tab. 5 Význam použitých indexů

<i>Označení</i>	<i>Význam</i>
<i>FL</i>	<i>Levé přední kolo</i>
<i>FR</i>	<i>Pravé přední kolo</i>
<i>RL</i>	<i>Levé zadní kolo</i>
<i>RR</i>	<i>Pravé zadní kolo</i>
<i>F</i>	<i>Přední</i>
<i>R</i>	<i>Zadní</i>
<i>x</i>	<i>x-ová souřadnice</i>
<i>y</i>	<i>y-souřadnice</i>
<i>P</i>	<i>Bod P</i>
<i>Q</i>	<i>Bod Q</i>

SEZNAM PŘÍLOH

Všechny vytvořené programy včetně elektronické verze diplomové práce jsou uloženy v příloženém CD. Archiv obsahuje dvě složky, ve složce *\Nucleo_F303K8* je uložen program pro obsluhu enkodérů, ve složce *\Matlab* jsou uloženy odometrické modely použité v simulacích, včetně dalších programů potřebných pro jejich funkci. V této složce jsou též nahrány textové soubory s příslušnými daty.

Simulace jízdy z naměřených dat lze spustit ze souborů *zpracuj_*.m*.